

房珊珊, 杨 珺, 强艳芳, 等. 南水北调中线工程水源地化肥施用时空分布特征及其环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 124–136.
FANG Shan-qi, YANG Jun, QIANG Yan-fang, et al. Distribution and environmental risk assessment of fertilizer application on farmland in the water source of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 124–136.

南水北调中线工程水源地化肥施用时空分布特征及其环境风险评价

房珊珊^{1,2}, 杨 珺^{1,2}, 强艳芳^{2,3}, 王彦东^{1,2}, 席建超⁴, 冯永忠^{1,2*}, 杨改河^{1,2}, 任广鑫^{1,2}

(1.西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2.陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要:为全面认识南水北调中线水源地农业化肥施用的时空分布差异及对生态环境的潜在威胁,加强化肥施用风险管控,以南水北调中线水源地县级 2002—2014 年化肥施用量及耕地面积年鉴数据为基础,结合实地调查,运用化肥污染环境风险评价模型,对水源地化肥投入的时空变化分布特征和环境风险进行分析和评价。结果表明:2002—2014 年水源地化肥施用明显过量且逐年增加,净增长 214.44 kg·hm⁻²,年平均增长率为 3.03%。水源地化肥施用强度是发达国家化肥施用安全标准上线的 2.74 倍,是全国化肥施用强度平均值的 1.50 倍,是我国生态县建设化肥施用负荷标准的 2.47 倍,且区域间存在差异。水源地整体化肥施用的风险指数呈逐年增加趋势,从 2002 年的 0.67 增至 2014 年的 0.74,增幅为 10.45%。多数地区化肥施用风险程度处于中等风险水平,其中西峡县、城固县、汉滨区和邓州市处于严重风险状态,宁陕县、神农架林区和紫阳县处于安全状态。水源地氮肥施用整体处于中等风险状态,磷肥施用风险整体处于低风险和尚安全状态。研究区化肥施用负荷过高是由体制、政策、技术、观念以及经济发展水平等多方面原因造成的,种植模式、施肥技术及管理方式是其直接原因,而农业体制和政策是其内在原因。相关部门应采取有效措施对化肥施用进行“控量增效”管理,如实行农业集约化经营,优化种植结构,加强农民环保意识和农技知识教育,提高农民科学施肥技术,普及推广配方施肥及测土施肥等。

关键词:南水北调中线工程;化肥施用负荷;时空特征;环境风险评价;水源地

中图分类号:X592 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)01-0124-13 **doi:**10.11654/jaes.2017-0871

Distribution and environmental risk assessment of fertilizer application on farmland in the water source of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project

FANG Shan-qi^{1,2}, YANG Jun^{1,2}, QIANG Yan-fang^{2,3}, WANG Yan-dong^{1,2}, XI Jian-chao⁴, FENG Yong-zhong^{1,2*}, YANG Gai-he^{1,2}, REN Guang-xin^{1,2}

(1.College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.The Research Center of Recycle Agricultural Engineering and Technology of Shaanxi Province, Yangling 712100, China; 3.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: To understand the temporal and spatial distribution of agricultural fertilizers and their potential threat to the ecological environment in the water source of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project, the present study utilized the fertilizer pollution environmental risk assessment model to analyze and evaluate the spatiotemporal variation and environmental risk of chemical fertilizer application in the water source area. This model was based on field investigation and yearbook data of the fertilizer application amounts and cultivated land areas from 2002 to 2014 at the county level. The results showed that the intensity of chemical fertilizer application had been sig-

收稿日期:2017-06-19 录用日期:2017-09-27

作者简介:房珊珊(1993—),女,陕西西安人,硕士研究生,从事农业面源污染方面的研究。E-mail:fshanqi@163.com

*通信作者:冯永忠 E-mail:fengyz@nwsuaf.edu.cn

基金项目:科技基础性工作专项(2015FY110400-3)

Project supported: The National Science and Technology Basic Project of the Ministry of Science and Technology of China(2015FY110400-3)

nificantly excessive and increased from 2002 to 2014, with a net increase of $214.44 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and an average annual growth rate of 3.03%. The intensity of fertilizer application was 2.74 times higher in the water source areas than in the safety standard fertilizer application of developed countries, which was 1.50 times the average value of fertilizer application in China and 2.47 times the intensity standard of fertilizer application in China's ecological county constructions. Additionally, the intensity of fertilizer application varied from region to region in the water source area. The total environmental risk index for cultivated land fertilizer application in the water source area increased year by year, increasing from 0.67 in 2002 to 0.74 in 2014, which was an increase of 10.45%. A medium risk level of fertilizer application was observed in the majority of areas. The areas under serious risk levels were Xixia, Chenggu, Hanbin, and Dengzhou, and the areas under safe levels were Shennongjia forest area, and Ningshan and Ziyang counties. The application of nitrogen fertilizer in the water source area was in the middle risk level, and the risk of phosphate fertilizer application was at a low risk level. Excessive intensity of chemical fertilizer application in the study area was caused by a wide range of sources, such as agricultural systems, different policies, technologies and ideas, and level of economic development. Planting patterns, fertilization techniques, and management methods were the direct causes of the overuse of fertilizers, whereas agricultural systems and policies were essential factors. The relevant government departments should take effective measures to control the application quantities of chemical fertilizers and improve fertilizer use efficiency, such as the implementation of agricultural intensive management, optimization of the planting structure, reinforcement of farmers' environmental awareness and agricultural knowledge education, improvement of farmers' scientific fertilization technology, and the popularization of soil testing and fertilizer recommendation.

Keywords: middle route of the South-to-North Water Transfer Project; fertilizer application level; temporal and spatial distribution; environmental risk assessment; water source area

农业化肥的施用有效促进了农作物增产^[1],但其不合理施用必然引起农业面源污染^[2]。农业化肥引起的面源污染已使美国近40%的湖泊和河流水质不达标^[3]。在瑞典,流域总氮输入量的60%~87%来源于农业化肥^[4],过度施用化肥致使德国部分河流中磷的浓度大于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[5]。我国农业面源污染问题更为突出、形势更加严峻,过量施用化肥以及化肥养分比例不合理施用是其主要原因^[6-8]。自1978年至今,我国农业化肥施用量年均增速为3%~5%,现年均化肥使用量为 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,超过全球平均水平的3倍多^[9-10]。到2015年,我国化肥总施用量达到5704.2万t,是世界化肥总用量的1/3,单位面积化肥施用量远超世界平均水平^[11],且我国的化肥利用效率不到50%^[12]。研究表明,未被作物吸收利用的大部分化肥养分通过挥发、地表径流及淋溶等方式进入大气和水体,必然对当地环境尤其是水环境造成严重的负面影响和污染^[2,12],如农业生产过程中过量施用氮磷元素必然会引起区域水体污染和富营养化^[13-14]。张维理等^[15]研究也表明,大量施用氮肥的地区会出现严重的土壤酸化、水质污染和地下水硝酸盐污染问题。综上所述,我国农业化肥使用所导致的环境问题是客观存在且风险巨大的^[9]。因此,明确化肥使用现状,评价化肥施用的环境风险,制定有效的风险防控策略已成为当务之急。

我国农业面源污染研究起步较晚,起初主要集中于农药、化肥、地膜等生产资料投入而导致农业面源污染现状的探讨^[16],后逐渐开始关注其成因、特点及

防治技术等方面研究^[17]。此外,还开展了有机污染物、集约化养殖和重金属污染等所造成的环境风险评估研究^[18-19],也有学者运用评价模型对部分地区化肥施用的环境风险进行了评价,结果表明,山东、江苏和淮河流域均存在较为严重的环境污染风险,其中山东省的氮、磷肥施用存在重度环境污染风险^[12],江苏^[20]和淮河流域^[21]化肥施用的环境污染风险程度地域分异明显。但对重要水源地化肥施用的环境风险评价研究相关报道仍然较少且仍需深入。

南水北调中线工程是解决京、津、冀地区资源性缺水的重大战略工程。水源地横跨湖北、河南和陕西3省,其生态环境状况直接影响着华北地区的用水安全和汉江中下游地区生态环境健康^[22]。研究表明,水源地产业结构仍以农业为主,农业人口达80%,部分地域化肥施用量远超国际环境安全阈值,肥料结构不合理,氮、磷、钾肥的利用率分别仅为30%~55%、10%~25%和35%~50%^[23]。水源地所涉及的河南省及湖北省都处于化肥面源污染重度风险状态^[24],潜在地威胁着水源地水质安全。前人对南水北调中线工程水源地的研究主要集中在农田土壤重金属危害评价^[25]、农业面源污染来源与控制^[23]以及生态环境变化^[26]等方面,而农业化肥施用作为农业面源污染的主要来源,其引起的环境风险评价研究在水源地的报道仅限于南阳市^[27]。因此,本文以南水北调中线水源地县级2002—2014年化肥施用量及耕地面积年鉴数据为依据,结合实地调查,运用化肥污染环境风险评价模型,分析

了化肥施用负荷及时空分布特征,计算了水源地化肥施用的风险指数,评价了其所处的风险程度,以期明确该区域化肥污染的环境风险现状及成因,为该区域化肥资源利用及农业可持续发展提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南水北调中线水源地范围包括河南、湖北、陕西3省的43个县(区、市),规划面积11.13万km²,其中核心区2.26万km²。区域内总人口1709.1万人,农村人口1031.78万人,耕地面积99.23万hm²[28]。

水源地范围界于31°20'~34°10'N,106°~112°E之间,位置如图1所示。研究区土地面积约为8.81万km²,土壤以黄棕壤为主,地貌形态多变,以中、低山和丘陵为主,坡度陡、切割深,海拔500~2000m之间。水源地气候为北亚热带季风气候,年平均降雨量800~1200mm。年平均气温为15~16℃,年平均日照时数为2121h,年无霜期225~240d,多年平均径流量368.7亿m³。该区域具有明显的亚热带与暖温带过渡性特征,植被垂直分异性显著。

1.2 环境风险评价模型

环境风险是指对各种社会经济活动所引发的或面临的危害(包括自然灾害)对人体健康、社会经济、生态系统等造成的可能损失进行评价,提出降低环境风险的方案及对策,并据此进行管理和决策的过程[21,29]。

目前 Hakanson 环境风险指数评价方法在河流和湖泊环境风险评价方面得到广泛应用,但其综合指数大于1,风险越高指数越大,无上限值,不易进行差别比较。本研究通过运用刘钦普[24]基于瑞典科学家 Hakanson[18]提出的重金属污染环境风险评价方法而设计出的化肥施用环境风险评价模型,对水源地化肥施用进行环境风险评价。

该模型得出的指数值介于0~1之间,有上限和下限,便于对风险程度进行比较,其计算公式如下:

$$F_i = \frac{M_i}{A} \quad (1)$$

$$R_i = \frac{F_i}{F_i + T_i} \quad (2)$$

$$R_T = \sum_{i=1}^n W_i R_i \quad (3)$$

式中: M_i 表示当年化肥施用量; A 表示耕地面积; F_i 表示化肥施用负荷; T_i 为单项化肥环境安全阈值; R_i 是化肥施用指数; W_i 为化肥施用风险权重,其值介于0~1; R_T 为施肥环境风险总指数; n 为单项化肥种类数。

公式(2)、(3)中的 R_i 与 R_T 介于0~1之间。

当 $R_i=0.5$ 时, $F_i=T_i$,即施肥环境安全的临界点;

当 R_i 、 R_T 趋近1时, $F_i>T_i$,即环境化肥污染存在极严重风险;

当 R_i 、 R_T 趋近0时, F_i 趋于0, $F_i<T_i$,即不施用化肥的有机农业状态。

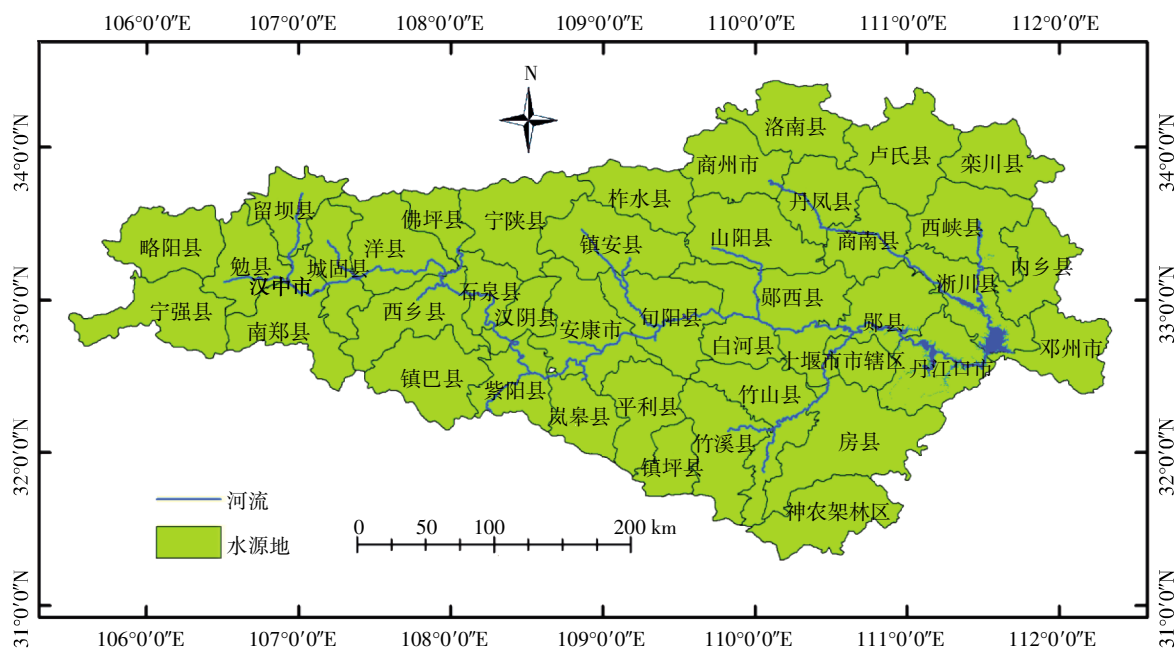


图1 南水北调中线水源地区域界定[26]

Figure 1 Regional identification of the water source of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project [26]

根据环境风险指数偏离 0.5 的程度,把化肥施用环境风险从高度安全到严重危险分为 6 个不同的等级^[24],如表 1 所示。

1.3 数据来源

研究中涉及的耕地面积和化肥施用量主要来源于《安康市统计年鉴》《汉中市统计年鉴》《南阳市统计年鉴》《商洛市统计年鉴》《十堰市统计年鉴》《湖北省统计年鉴》《陕西省统计年鉴》(2002—2015)及实地调研。课题组于 2016 年 12 月—2017 年 4 月对水源地农户进行抽样调查,以大于 2014 年水源地化肥施用负荷各等级区域个数(低级 3 个、中级 12 个、较高级 13 个和高级 8 个,表 4)的 55%确定调查地区个数,共调查 19 个地区(低级 2 个、中级 6 个、较高级 6 个和高级 5 个),各等级下各地区自西向东随机分布,此次农户调查共收回 609 份问卷,剔除无效信息,共获得 602 份有效问卷,各地区调查的问卷数以其 2014 年耕地面积占调查区域总耕地面积的比例确定,详见表 2。各地区均采用随机抽样方式确定调查对象,调查方法为半结构化访谈,调查主要内容包括:家庭基本情况、耕地面积变化、施肥量情况、化肥施用的驱动因素、化肥购买能力及影响因素、施肥技术及限制因素、

表 1 化肥污染环境风险指数分级

Table 1 Classification of fertilization environmental risk indexes

等级 Class	环境风险指数 Environmental risk index	风险程度 Degree of environmental risk
1	≥ 0.80	严重风险 Serious risk
2	0.65~0.79	中等风险 Medium risk
3	0.50~0.64	低风险 Light risk
4	0.35~0.49	尚安全 Relative safety
5	0.20~0.34	中等安全 Medium safety
6	≤ 0.19	高度安全 Highly safety

影响施肥的相关政策等方面。

1.4 数据处理

运用 Excel 2010 对化肥施用量、化肥施用负荷和环境风险总指数进行统计计算,采用 SPSS 19.0 对统计数据和调查数据进行 Pearson 相关性分析和线性拟合分析,运用 Origin 9.0 和 ArcGIS V10.2 软件作图。

2 结果分析

2.1 水源地化肥施用量变化特征

2002—2014 年南水北调中线水源地化肥施用量如图 2 所示。水源地化肥施用量总体呈现逐年增加的

表 2 调查地区概况及问卷分布情况

Table 2 Profile distribution and number of questionnaires in survey area

区县 Counties	2014 年耕地面积占调查区域耕地总面积的比例/% The proportion of cultivated land in 2014/%	问卷数/份 Number of questionnaires/ copies	2014 年化肥施用负荷等级 Classifications of fertilizer application intensity
略阳县 Lueyang County	1.74	11	中级
宁强县 Ningqiang County	3.69	22	较高级
佛坪县 Foping County	0.32	6	中级
城固县 Chenggu County	4.19	25	高级
西乡县 Xixiang County	3.81	23	较高级
勉县 Mian County	4.57	28	高级
平利县 Pingli County	3.18	19	中级
旬阳县 Xunyang County	6.32	38	较高级
汉阴县 Hanyin County	4.00	24	较高级
紫阳县 Ziyang County	4.21	25	低级
汉滨区 Hanbin District	7.42	45	高级
淅川县 Xichuan County	10.00	60	高级
栾川县 Luanchuan County	3.20	19	较高级
商州区 Shangzhou District	3.69	22	中级
丹凤县 Danfeng County	2.11	13	较高级
商南县 Shangnan County	2.46	15	中级
镇安县 Zhen'an County	3.75	23	中级
神农架林区 Shennongjia forest area	0.83	5	低级
十堰市 Shiyan City	30.48	180	高级

态势,年化肥施用总量从2002年的51.12万t上升至2014年的76.40万t,增幅达49.45%,年平均增长率为3.4%。2004—2006年和2010—2012年化肥施用量增长较快,分别占2002—2014年总增长量的32.63%和30.70%,这是由于国家颁布了土地流转承包等一系列惠民补贴政策,农民有更多的资金投入到了化肥购买中,同时耕地面积分别增加77.36 hm²和68.49 hm²,导致化肥施用量增加。从图2可看出,2002—2014年年平均化肥施用量排名前五的地区有十堰市、邓州市、淅川县、城固县和汉滨区,它们占水源地平均施肥量的比例分别为18.41%、18.40%、6.63%、4.90%和4.89%,因为这些地区耕地面积较大,水热条件适宜,适合农作物生长,大量施肥可提高作物产量。年平均化肥施用量较少的地区主要有宁陕县、佛坪县、留坝县、镇坪县和神农架林区等地,这些地区经济落后,用于购买化肥的资金较少,加之交通不便导致化肥成本较高,从而导致这些地区化肥施用量较小。此外,调查发现,自2002年退耕还林实施以来,这些地区耕地面积减少30%~40%,35%~55%的劳动力向城市转移,从而导致耕地用肥量相对较少。自2002—2014年,施肥量增量较大的地区主要为邓州市、十堰市、汉滨区、淅川县和城固县,其增量分别为9.78万t、3.48万t、2.77万t、1.50万t和1.44万t,增幅较大的地区分别为汉滨区、邓州市、柞水县、勉县、汉阴县、镇安县和城固县,其增幅分别为133.80%、128.08%、95.07%、82.25%、68.00%、65.32%和64.20%,这是由于这些地区经济发展以农业为主,农民通过增加施肥量来提高作物产量,以增加经济收入,同时,这些地区在退耕还林实施过后存在复耕现象。

对水源地19个地区抽样调查显示,不同地区不同作物的化肥施用比例存在差异(表3)。水源地各地

区耕地用肥占主导,其用肥比例为92.15%~98.92%,而耕地用肥中粮食作物的用肥量较大,占比53.71%~88.56%,除耕地外其他土地利用方式的用肥量相对较小,用肥比例不足8%。调查发现,用肥量及用肥增量较大的十堰市、汉滨区、淅川县、勉县和城固县,它们的耕地用肥量均大于98%,耕地用肥中蔬菜用肥占比较大,为18.29%~40.56%,此外,城固县耕地用肥中其他作物用肥占比20.45%,主要为油料作物用肥。略阳县、佛坪县和西乡县的茶果用肥量大于4.5%,主要是因为这些地区有一定规模的茶叶种植基地。

2.2 水源地化肥施用负荷变化特征

2.2.1 水源地化肥施用负荷的时间变化特征

2002—2014年研究区耕地面积变化情况如图3所示。研究区耕地面积整体呈递增趋势,仅在2002—2004年间减少16 349 hm²,降幅为1.59%。自2004年起研究区耕地面积逐年增加,2004—2014年间其耕地面积年平均增加量为6245 hm²,年平均增长率为0.60%。

由图3可知,2002—2014年水源地化肥施用负荷值集中在400~700 kg·hm⁻²之间,水源地年平均化肥施用负荷为617.38 kg·hm⁻²,是发达国家化肥施用安全标准上限225 kg·hm⁻²的2.74倍,是2010年全国化肥施用强度平均水平411.30 kg·hm⁻²的1.50倍,是我国环保总局规定的生态县建设化肥施用负荷标准250 kg·hm⁻²的2.47倍。2002—2014年化肥施用负荷总体呈增长趋势,净增长214.44 kg·hm⁻²,年平均增长率为3.03%。其中2002—2006年呈现明显增长趋势,增长了119.32 kg·hm⁻²,占2002—2014年化肥施用负荷总增量的55.64%,这是在此期间耕地面积下降而化肥施用量增加所导致的(图3)。此外,研究区化肥施用负荷在2006—2008年期间呈现小幅度下降,减

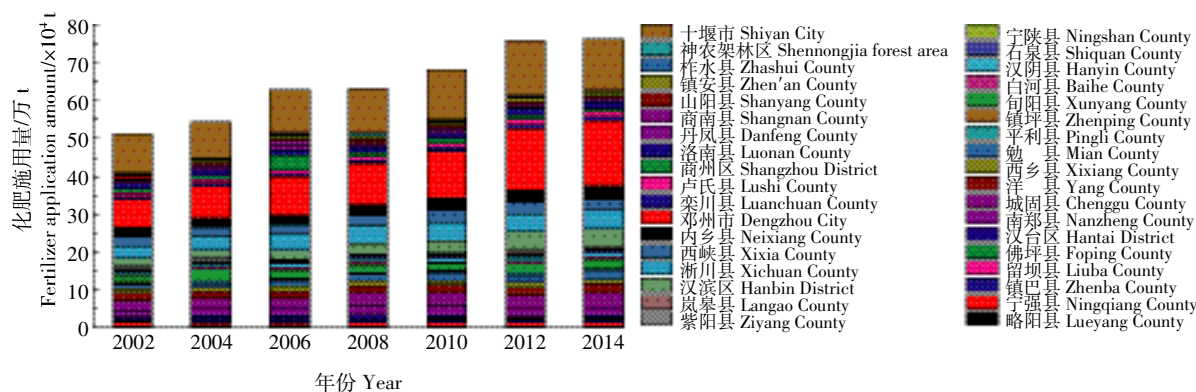


图2 2002—2014年水源地化肥施用量变化情况(万t)

Figure 2 Dynamics of fertilizer use in the water source areas from 2002 to 2014($\times 10^4$ t)

表 3 水源地部分地区化肥施用分类统计

Table 3 Classification of chemical fertilizer application in some water source areas

区县 Counties	耕地用肥比例 Fertilizer application ratio of farmland/%				其他土地利用方式用肥比例 Fertilizer application ratio of other land use types/%			
	粮食 Food crops	蔬菜 Vegetables	其他作物 Other crops	合计 Total	药材 Herbs	茶果 Fruit and tea	食用菌 Edible fungus	其他 Others
略阳县 Lueyang County	80.43	4.87	6.85	92.15	1.20	4.52	0	2.13
宁强县 Ningqiang County	85.76	4.51	5.83	96.10	2.34	0.14	1.25	0.17
佛坪县 Foping County	82.34	6.20	4.36	92.90	1.05	5.32	0	0.73
城固县 Chenggu County	60.07	18.29	20.45	98.81	0.24	0.35	0.12	0.47
西乡县 Xixiang County	86.72	4.13	3.02	93.87	0.25	5.22	0	0.66
勉县 Mian County	71.25	21.32	6.07	98.64	0.54	0.46	0	0.36
平利县 Pingli County	83.36	7.24	3.21	93.81	3.02	2.02	0	1.15
旬阳县 Xunyang County	77.41	7.95	11.22	96.58	1.24	2.02	0	0.15
汉阴县 Hanyin County	62.00	31.15	2.65	95.80	1.25	0.57	0	2.39
紫阳县 Ziyang County	90.25	3.36	3.54	97.15	0.56	2.21	0	0.08
汉滨区 Hanbin District	53.71	40.56	4.18	98.45	0.02	1.24	0	0.29
淅川县 Xichuan County	81.65	6.33	10.36	98.34	1.24	0.14	0.09	0.19
栾川县 Luanchuan County	83.34	7.35	5.35	96.05	0.15	1.57	0.14	2.10
商州区 Shangzhou District	73.40	18.37	5.21	96.98	0.14	0.21	2.53	0.14
丹凤县 Danfeng County	80.65	12.31	5.11	98.08	1.42	0.06	0	0.44
商南县 Shangnan County	88.56	4.45	2.31	95.32	1.11	2.02	0.13	1.42
镇安县 Zhen'an County	81.38	14.37	1.25	97.00	0.54	1.07	0.15	1.25
神农架林区 Shennongjia forest area	84.23	5.05	4.31	93.59	2.34	2.32	0	1.75
十堰市 Shiyan City	60.25	30.88	7.79	98.92	0.14	0.25	0.53	0.16

少量为 $14.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.2.2 水源地化肥施用负荷空间变化特征

以我国环保总局 2007 年规定的我国生态县建设化肥施用负荷标准 ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、2010 年全国化肥施用负荷平均值 ($411.30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和我国生态县建设化肥施用负荷标准的 3 倍值 ($750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 作为分级标准, 将研究区化肥施用负荷 (F) 由低到高分四个等级, 分别为低级 ($F \leq 250$)、中级 ($250 < F \leq 411$)、较

高级 ($411 < F \leq 750$) 和高级 ($F > 750$)。氮磷单质化肥的负荷分级按照我国大田作物适宜的氮磷钾比例 (1:0.5:0.5) 进行折算^[21]。

2002、2008、2014 年水源地化肥施用负荷的区域空间特征如图 4 所示。2002 年水源地化肥施用负荷量处在中级 ($250 \sim 411 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 与较高级 ($411 \sim 750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 水平的地区, 分别占总区域数的 27.78% 和 47.22%, 合计 75%, 主要集中于水源地西部的汉中市及东南部的十堰市, 由于这些地区人口较多且靠近地级市城市, 粮食、蔬果需求较大, 从而导致化肥施用负荷较大。低负荷量 ($\leq 250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 地区共 7 个, 主要分布在水源地南部的安康市。高负荷量 ($> 750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 地区共 2 个, 分布在汉中的城固县和南阳市的西峡县。2008 年水源地化肥施用负荷量集中在中级和较高级, 分别占总区域数的 33.33% 和 41.67%, 主要分布在水源地西部的汉中市、东南部的十堰市及北部的商洛市, 这些地区主要为周边地级市城市居民提供农产品, 以水果、蔬菜等化肥用量较大的经济作物为主, 从而导致较大的施用负荷。相较于 2002 年, 2008 年低负荷量地区数减少了 11.11%, 高负荷量地区数增加

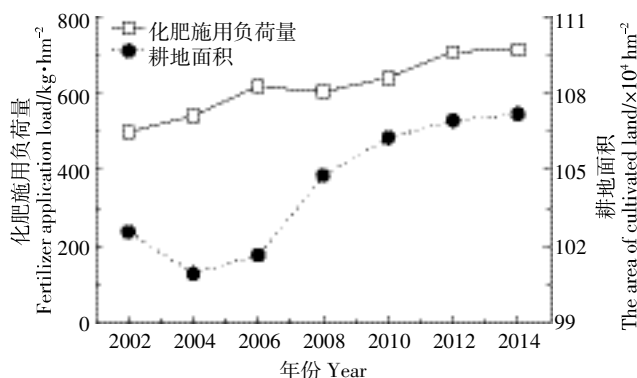


图 3 2002—2014 年水源地耕地面积和化肥施用负荷变化
Figure 3 Changes of cultivated land area and fertilizer application level in the water source areas from 2002 to 2014

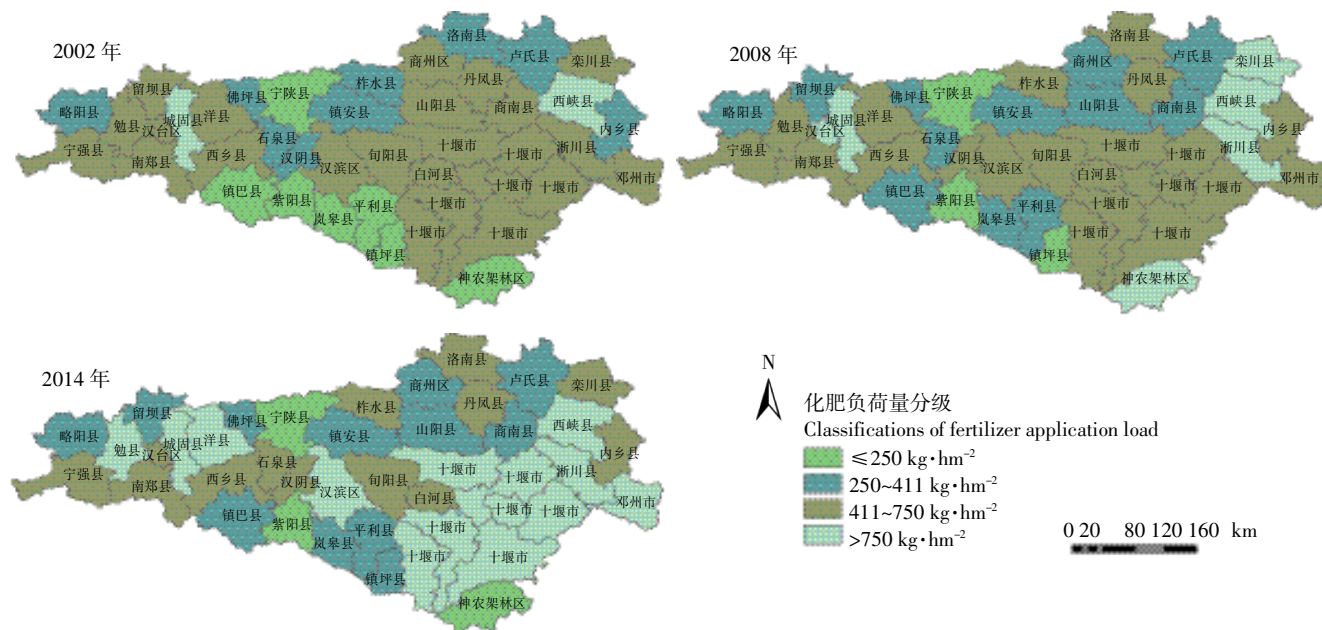


图4 2002、2008、2014年水源地各地区化肥施用负荷量

Figure 4 Per unit area fertilizer application at country level in the water source areas in 2002, 2008 and 2014

11.11%,高负荷地区主要分布于研究区东部的南阳市和洛阳市以及西部的汉中市,这些地区经济发达,农民有较多的资金投入到化肥购买中,从而使化肥施用负荷较大。2014年水源地高负荷量地区数较2008年增长2个,但区域面积大幅提升,这是因为湖北省十堰市从较高负荷量 $697.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 转变为高负荷量 $766.78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,高负荷量主要分布在东南部的十堰市、西部汉中的城固县、洋县和勉县以及东部南阳市的淅川县、西峡县和邓州市,这些地区的耕地多位于坡度较大的山地,且施肥方式为传统的地表施肥,地表径流会导致化肥流失,当地农民以较大的施肥量来弥补化肥的损失,从而导致施用负荷较高。较高级负荷量地区有所减少,区域个数降低了5.56%。中级负荷量地区与2008年数量及分布变化不大,主要分布在北部商洛市、西部的汉中市和南部的安康市。低负荷量地区数量未变化,但分布从镇坪县变为神农架林区。2002—2014年平均化肥施用负荷值较大的地区为西峡县、城固县、十堰市、淅川县和汉滨区,其值均大于 $700 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施用负荷较小的区县为宁陕县、紫阳县、镇坪县和平利县,其值小于我国生态县建设化肥施用负荷标准 ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。此外,化肥施用负荷最高的西峡县是施用负荷最小的宁陕县的12.95倍。这表明,水源地各地区化肥施用负荷整体较大且区域间存在差异。

对水源地19个地区总化肥、氮肥和磷肥的施用

负荷如表4所示。调查数据与统计数据的相对偏差为0.55%~2.04%,两者线性回归方程为: $y=0.9797x-1.907$ ($R^2=0.99, P<0.01$),表明调查数据与统计数据的吻合度较高,数据可信。总化肥施用负荷处于高级的5个地区,其氮肥施用负荷均处于高级,2个地区磷肥施用负荷为高级,3个地区磷肥施用负荷为较高级。总化肥施用负荷处于较高级的6个地区中,氮肥施用负荷分级为5个较高级、1个高级,磷肥施用负荷分级为1个较高级、5个中级。总化肥施用负荷处于中级的6个地区,氮肥施用负荷分级为4个中级、2个较高级,磷肥施用负荷分级为2个中级、4个低级。总化肥施用负荷处于低级的2个地区中,氮肥施用负荷为1个中级、1个低级,磷肥均处于低级负荷状态。这表明水源地氮肥施用负荷在化肥施用过程中占主导作用。同时,氮肥施用负荷占比为56%~69%,磷肥施用负荷占比为14%~26%,氮磷肥比例为1:0.24~1:0.44,低于发达国家1:0.5的比例,表明水源地氮肥施用负荷相对较大。此外,相关性分析表明总化肥施用负荷与氮肥和磷肥的施用负荷呈极显著正相关 ($P<0.01$),相关性系数分别为0.991和0.968,氮肥施用负荷与磷肥施用负荷呈极显著正相关 ($P<0.01$),相关性系数为0.969。

2.3 化肥施用环境风险评价

参考我国环保总局2007年关于生态县建设中化肥施用强度小于 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的评价标准,定义250

表 4 2014 年水源地部分地区总化肥、氮肥和磷肥的施用负荷量及分级

Table 4 Fertilization intensity and classifications of total fertilizer, nitrogen fertilizer and phosphate fertilizer in some water source areas in 2014

区县 Counties	总化肥 Total fertilizer			氮肥 Nitrogen fertilizer		磷肥 Phosphate fertilizer		氮磷肥 比例
	负荷 Intensity/ kg·hm ⁻²	分级 Classifica- tions	与统计数据的 相对偏差 Relative deviation/%	负荷(比重) Intensity (Proportions)/ kg·hm ⁻²	分级 Classifications	负荷(比重) Intensity (Proportions)/ kg·hm ⁻²	分级 Classifications	
略阳县 Lueyang County	354.42	中级	1.13	219.74(0.62)	较高级	74.43(0.21)	中级	1:0.34
宁强县 Ningqiang County	553.08	较高级	0.55	337.38(0.61)	较高级	105.09(0.19)	较高级	1:0.31
佛坪县 Foping County	288.15	中级	1.99	181.53(0.63)	中级	60.51(0.21)	低级	1:0.33
城固县 Chenggu County	1 506.27	高级	0.87	1 039.33(0.69)	高级	346.44(0.23)	高级	1:0.33
西乡县 Xixiang County	601.69	较高级	1.49	348.98(0.58)	较高级	84.24(0.14)	中级	1:0.24
勉县 Mian County	790.81	高级	1.66	482.39(0.61)	高级	173.98(0.22)	较高级	1:0.36
平利县 Pingli County	251.14	中级	1.97	155.71(0.62)	中级	60.27(0.24)	低级	1:0.39
旬阳县 Xunyang County	660.98	较高级	1.01	383.37(0.58)	高级	99.15(0.15)	中级	1:0.26
汉阴县 Hanyin County	469.55	较高级	0.68	314.60(0.67)	较高级	75.13(0.16)	中级	1:0.24
紫阳县 Ziyang County	205.72	低级	1.62	131.66(0.64)	中级	47.32(0.23)	低级	1:0.36
汉滨区 Hanbin District	1 095.64	高级	1.72	646.43(0.59)	高级	284.87(0.26)	高级	1:0.44
淅川县 Xichuan County	825.43	高级	0.86	462.24(0.56)	高级	148.58(0.18)	较高级	1:0.32
栾川县 Luanchuan County	489.24	较高级	1.16	278.87(0.57)	较高级	83.17(0.17)	中级	1:0.30
商州区 Shangzhou District	300.16	中级	1.62	195.10(0.65)	中级	48.03(0.16)	低级	1:0.25
丹凤县 Danfeng County	449.80	较高级	0.65	260.88(0.58)	较高级	89.96(0.2)	中级	1:0.34
商南县 Shangnan County	359.49	中级	2.04	204.91(0.57)	中级	61.11(0.17)	低级	1:0.30
镇安县 Zhen'an County	392.24	中级	1.00	251.03(0.64)	较高级	86.29(0.22)	中级	1:0.34
神农架林区 Shennongjia forest area	60.31	低级	1.78	40.41(0.67)	低级	8.44(0.14)	低级	1:0.21
十堰市 Shiyan City	752.92	高级	0.91	496.93(0.66)	高级	180.70(0.24)	较高级	1:0.36

kg·hm⁻² 为总化肥施用环境安全阈值。氮磷单质肥料的安全阈值按照我国大田作物适宜的氮磷钾比例(1:0.5:0.5)进行折算,确定氮肥的环境安全阈值为 150 kg·hm⁻²,磷肥的阈值为 62.5 kg·hm⁻²[21]。根据环境风险评价模型(2)和(3)及相关参数,计算得出 2002—2014 年水源地各地区化肥施用风险评价指数及所处的风险程度(表 5)。

由表 5 可知,2002—2014 年水源地整体化肥施用风险程度处于中等风险水平,风险指数呈逐年增加趋势,从 2002 年的 0.67 增至 2014 年的 0.74,增幅为 10.45%。水源地各地区风险指数随年份的增加整体表现为波动性增加趋势,2002—2014 年间,略阳县、佛坪县和南郑县等 15 个地区风险程度保持不变,且除紫阳县(尚安全)和西峡县(严重风险)外,其他 13 个地区均处于低风险或中等风险状态。2002—2014 年间,宁强县、镇巴县和城固县等 16 个地区风险程度上升,其中城固县、汉滨区、邓州市和商州区出现严重风险水平,而其他 12 个地区均处于低风险或中等风险状态。此外,留坝县和汉台区等 5 个地区风险程度

出现降低态势,除宁陕县和神农架林区表现出安全状态外,其他 3 个地区仍处于风险状态。

以 2002 年、2008 年和 2014 年为例,分析水源地化肥施用环境风险等级的空间特征(图 5)。2002 年水源地各地区化肥施用环境风险等级整体处于中等风险和低风险状态,共计 28 个地区;严重风险程度的地区 1 个,为西峡县;尚安全地区 7 个,主要分布在研究区北部的汉中的宁陕县、南部的安康市镇坪、紫阳等县及神农架林区。2008 年水源地各地区化肥施用环境风险等级较 2002 年有所变化,研究区北部的宁陕县由尚安全状态转变为中等安全;南部的紫阳县和镇平县仍保持为尚安全状态;低风险状态的地区仍为 14 个,但区域发生了变化,主要分布在研究区北部的商洛市和汉中市以及南部的安康市;中等风险的程度为 17 个,与 2002 年比,部分低风险地区转变为中等风险状态,如宁强县、柞水县和内乡县等,中等风险的程度主要分布于研究区东部的南阳市、南部的十堰市及西部的汉中市;严重风险等级的地区增加 1 个,为汉中的城固县。2014 年水源地各地区化肥施用

表 5 2002—2014 年水源地各地区化肥施用风险指数及风险等级

Table 5 Environmental risk index and degree of fertilization application in the water source areas from 2002 to 2014

地区 Counties	2002 年		2004 年		2006 年		2008 年		2010 年		2012 年		2014 年	
	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D
略阳县 Lueyang County	0.61	LR	0.58	LR	0.60	LR	0.61	LR	0.59	LR	0.58	LR	0.59	LR
宁强县 Ningqiang County	0.63	LR	0.64	LR	0.63	LR	0.65	MR	0.67	MR	0.69	MR	0.69	MR
镇巴县 Zhenba County	0.49	RS	0.52	LR	0.54	LR	0.57	LR	0.60	LR	0.55	LR	0.55	LR
留坝县 Liuba County	0.65	MR	0.58	LR	0.51	LR	0.54	LR	0.54	LR	0.52	LR	0.52	LR
佛坪县 Foping County	0.57	LR	0.51	LR	0.65	LR	0.59	LR	0.55	LR	0.54	LR	0.55	LR
汉台区 Hantai District	0.71	MR	0.75	MR	0.75	MR	0.75	MR	0.70	MR	0.64	LR	0.71	MR
南郑县 Nan Zheng County	0.70	MR	0.71	MR	0.73	MR	0.73	MR	0.74	MR	0.73	MR	0.74	MR
城固县 Chenggu County	0.77	MR	0.80	MR	0.81	SR	0.86	SR	0.86	SR	0.85	SR	0.86	SR
洋县 Yang County	0.75	MR	0.72	MR	0.70	MR	0.71	MR	0.73	MR	0.74	MR	0.78	MR
西乡县 Xixiang County	0.69	MR	0.67	MR	0.70	MR	0.71	MR	0.71	MR	0.72	MR	0.71	MR
勉县 Mian County	0.67	MR	0.68	MR	0.72	MR	0.74	MR	0.76	MR	0.76	MR	0.77	MR
平利县 Pingli County	0.47	RS	0.50	RS	0.51	LR	0.50	LR	0.50	RS	0.50	LR	0.51	LR
镇坪县 Zhenping County	0.45	RS	0.43	RS	0.44	RS	0.49	RS	0.52	LR	0.51	LR	0.53	LR
旬阳县 Xunyang County	0.66	MR	0.78	MR	0.72	MR	0.69	MR	0.67	MR	0.72	MR	0.73	MR
白河县 Baihe County	0.58	LR	0.66	MR	0.65	MR	0.65	MR	0.57	LR	0.67	MR	0.63	LR
汉阴县 Hanyin County	0.54	LR	0.61	LR	0.62	LR	0.63	LR	0.64	LR	0.66	MR	0.66	MR
石泉县 Shiquan County	0.54	LR	0.52	LR	0.55	LR	0.60	LR	0.62	LR	0.63	LR	0.63	LR
宁陕县 Ningshan County	0.41	RS	0.39	RS	0.35	RS	0.33	MS	0.29	MS	0.32	MS	0.29	MS
紫阳县 Ziyang County	0.45	RS	0.46	RS	0.45	RS	0.46	RS	0.47	RS	0.46	RS	0.46	RS
岚皋县 Langao County	0.48	RS	0.52	LR	0.52	LR	0.53	LR	0.54	LR	0.54	LR	0.52	LR
汉滨区 Hanbin District	0.66	MR	0.67	MR	0.68	MR	0.72	MR	0.74	MR	0.82	SR	0.82	SR
浙川县 Xichuan County	0.68	MR	0.72	MR	0.74	MR	0.76	MR	0.77	MR	0.76	MR	0.77	MR
西峡县 Xixia County	0.87	SR	0.84	SR	0.87	SR	0.88	SR	0.88	SR	0.88	SR	0.87	SR
内乡县 Neixiang County	0.61	LR	0.64	LR	0.64	LR	0.67	MR	0.70	MR	0.70	MR	0.70	MR
邓州市 Dengzhou City	0.65	MR	0.67	MR	0.72	MR	0.73	MR	0.74	MR	0.79	MR	0.80	SR
栾川县 Luanchuan County	0.73	MR	0.76	MR	0.76	MR	0.76	MR	0.67	MR	0.67	MR	0.67	MR
卢氏县 Lushi County	0.52	LR	0.53	LR	0.56	LR	0.57	LR	0.59	LR	0.60	LR	0.60	LR
商州区 Shangzhou District	0.63	LR	0.65	LR	0.87	SR	0.57	LR	0.68	MR	0.68	MR	0.55	LR
洛南县 Luonan County	0.61	LR	0.61	LR	0.63	LR	0.65	LR	0.69	MR	0.69	MR	0.70	MR
丹凤县 Danfeng County	0.70	MR	0.77	MR	0.83	SR	0.68	MR	0.66	MR	0.65	LR	0.65	LR
商南县 Shangnan County	0.63	LR	0.60	LR	0.79	MR	0.55	LR	0.58	LR	0.60	LR	0.60	LR
山阳县 Shanyang County	0.62	LR	0.58	LR	0.59	LR	0.60	LR	0.60	LR	0.60	LR	0.60	LR
镇安县 Zhen'an County	0.56	LR	0.53	LR	0.45	RS	0.61	LR	0.57	LR	0.61	LR	0.62	LR
柞水县 Zhazhui County	0.55	LR	0.68	MR	0.71	MR	0.72	MR	0.71	MR	0.71	MR	0.70	MR
神农架林区 Shennongjia forest area	0.36	RS	0.40	RS	0.72	MR	0.76	MR	0.64	LR	0.73	MR	0.20	MS
十堰市 Shiyan City	0.74	MR	0.74	MR	0.75	MR	0.74	MR	0.75	MR	0.77	MR	0.75	MR
水源地 Water source area	0.67	MR	0.68	MR	0.71	MR	0.71	MR	0.72	MR	0.74	MR	0.74	MR

注: I. 环境风险指数, D. 风险程度, SR. 严重风险, MR. 中等风险, LR. 低风险, RS. 尚安全, MS. 中等安全, HS. 高度安全。下同。

Note: I. Environmental risk index, D. Degree of environmental risk, SR. Serious risk, MR. Medium risk, LR. Light risk, RS. Relative safety, MS. Medium safety, HS. Highly safety. The same below.

环境风险等级较 2002 年和 2008 年更为严峻, 中等安全状态的地区数为 2 个, 分别为宁陕县和神农架林区; 尚安全的地区仅紫阳县 1 个; 低风险的地区为 15

个, 主要分布在研究区北部的商洛市和汉中市以及南部的安康市; 中等风险程度的地区较 2008 年有所下降, 为 14 个, 主要是由于部分中等风险的地区转变为

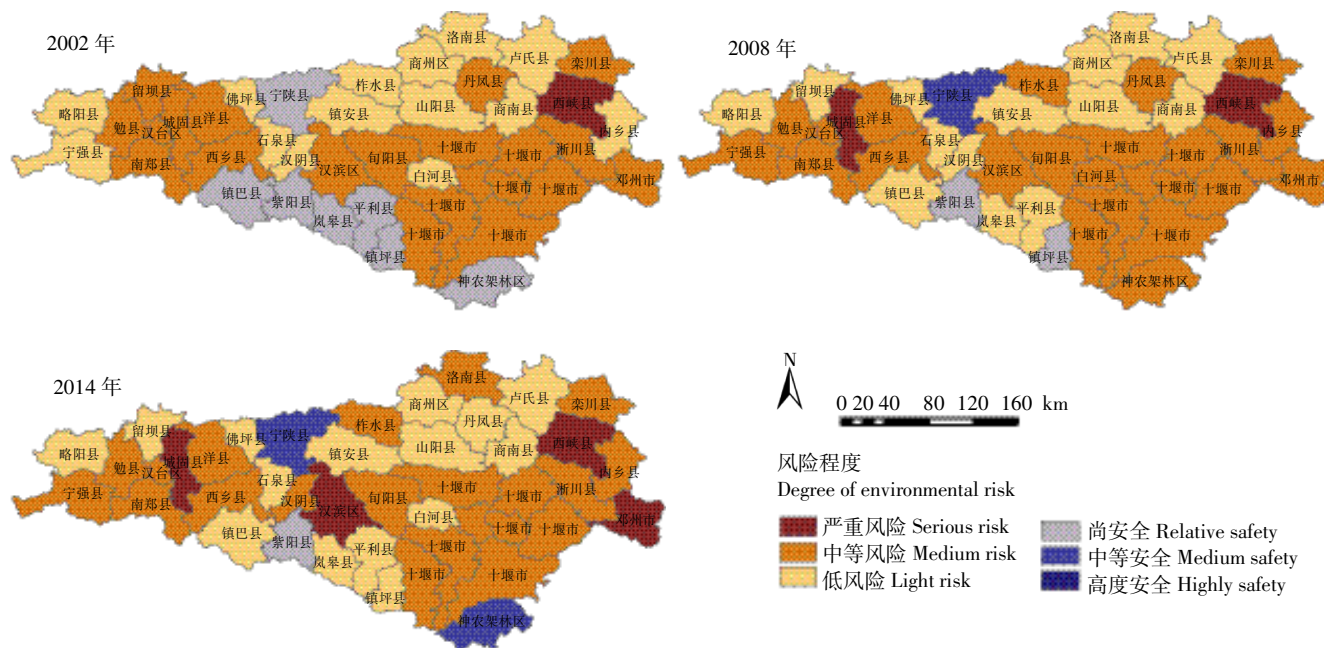


图 5 2002、2008、2014 年水源地各地区化肥施用风险评价

Figure 5 Environmental risk assessment of fertilizer application at county level in the water source areas in 2002, 2008 and 2014

严重风险如汉滨区和邓州市,中等风险的地区主要分布在研究区东部的南阳市、南部的十堰市及西部的汉中市;严重风险的地区为 4 个,分别为西峡县、城固县、汉滨区和邓州市。

在调查的 19 个地区中,氮肥施用风险处于中等风险状态的地区共 10 个,占比 52.63%,严重风险状态的地区为汉滨区和城固县,低风险状态的地区有 6 个,中等安全的地区为神农架林区 1 个(表 6)。磷肥施用风险整体处于低风险和尚安全状态,分别占比 42.11%和 26.32%,严重风险的地区为汉滨区和城固县,中等风险的地区 3 个,高度安全的地区为神农架林区(表 6)。由表 6 可知,总化肥施用处于严重风险的地区中,其氮磷肥施用风险仍处于严重风险状态;总化肥施用处于中等风险的 8 个地区,其氮肥施用仍处于中等风险状态,但其磷肥施用仅 3 个地区处于中等风险状态,其他 5 个地区处于低风险状态;总化肥施用处于低风险的 7 个地区中,氮肥施用处于低风险状态为 5 个、中等风险状态的为 2 个;总化肥施用处于尚安全的紫阳县,其氮肥施用处于低风险状态,磷肥施用处于尚安全状态;总化肥施用处于高度安全的神农架林区,其氮肥施用处于中等安全险状态,磷肥施用处于高度安全状态。这表明水源地氮肥施用的风险程度高于总化肥施用风险,而磷肥施用的环境风险与总化肥施用保持一致或相对较低。

表 6 2014 年水源地部分地区氮磷肥施用环境风险评价

Table 6 Environmental risk assessment of nitrogen and phosphorus fertilizer application in the water source areas in 2014

区县 Counties	总化肥 Total fertilizer		氮肥 Nitrogen fertilizer		磷肥 Phosphate fertilizer	
	I	D	I	D	I	D
略阳县 Lueyang County	0.59	LR	0.64	LR	0.54	LR
宁强县 Ningqiang County	0.69	MR	0.73	MR	0.63	LR
佛坪县 Foping County	0.54	LR	0.59	LR	0.49	RS
城固县 Chenggu County	0.86	SR	0.89	SR	0.85	SR
西乡县 Xixiang County	0.71	MR	0.74	MR	0.57	LR
勉县 Mian County	0.76	MR	0.79	MR	0.74	MR
平利县 Pingli County	0.50	LR	0.55	LR	0.49	RS
旬阳县 Xunyang County	0.73	MR	0.75	MR	0.61	LR
汉阴县 Hanyin County	0.65	MR	0.72	MR	0.55	LR
紫阳县 Ziyang County	0.45	RS	0.51	LR	0.43	RS
汉滨区 Hanbin District	0.81	SR	0.84	SR	0.82	SR
淅川县 Xichuan County	0.77	MR	0.79	MR	0.70	MR
栾川县 Luanchuan County	0.66	MR	0.69	MR	0.57	LR
商州区 Shangzhou District	0.55	LR	0.61	LR	0.43	RS
丹凤县 Danfeng County	0.64	LR	0.68	MR	0.59	LR
商南县 Shangnan County	0.59	LR	0.62	LR	0.49	RS
镇安县 Zhen'an County	0.61	LR	0.67	MR	0.58	LR
神农架林区 Shennongjia forest area	0.19	HS	0.24	MS	0.12	HS
十堰市 Shiyan City	0.75	MR	0.80	MR	0.74	MR

3 讨论

3.1 水源地化肥施用量及施用负荷的时空特征分析

2002—2014年水源地年化肥施用总量增加49.45%,年平均增长率为3.4%,水源地单位耕地面积化肥施用负荷呈增长趋势,年平均增长率为3.03%,这与同期我国化肥投入量的变化趋势一致^[24]。从图2和图3可知,施肥量、耕地面积和施用负荷均逐年增加,表明施肥量的增加幅度较大。首先是由水源地独特的地理环境决定的,水源地以山地农业为主^[25],78%的耕地多位于坡面,径流较大,保肥性差,化肥流失严重,导致化肥施用量增加^[30];其次,受国家及地方政策影响,自2002年开始水源地实行大规模退耕还林,但自2004年开始由于补助的粮食和津贴难以满足当地农民需求,部分农民逐步开始复耕,导致化肥施用量逐渐增加,同时,2006年开始全国实行免征农业税,导致农民投入到购买化肥的资金增加20%^[26],进而造成水源地化肥施用量增加;其次,近年来我国化肥生产技术飞速发展,化肥生产成本下降,加之政府出台的化肥间接补贴及对化肥生产企业的优惠政策^[20],导致化肥产量增加、价格偏低,引起水源地农民过量使用化肥;再次,水源地98%的农业经营模式为个体农户经营,85%的农户采用地表撒施方式施肥,缺乏新型专业施肥技术,导致肥料利用率低、损耗大、用肥量增加。另外,水源地仅8%的农户施用有机肥,进而导致化肥施用量的增加,也导致水源地化肥施用负荷高于山东省^[12]和江苏省^[20]等规模化、专业化种植大省。此外,水源地以粮食、蔬菜、油料等需肥量较大的作物为主,药材、食用菌等需肥量少而经济价值较高的作物种植面积不到2%,种植结构的不合理也导致水源地化肥施用量较大。

研究结果还表明,水源地各地区化肥施用负荷区域间存在差异,地区间化肥使用存在不平衡现象。这主要是由于水源地各地区间地形地貌、水热条件、经济现状、作物类型、施肥方式等差异造成的^[25,30-31],如勉县、城固县和洋县等地耕地多位于坡度较大的山地,地表径流较大,易导致肥料损失,从而导致较大的施用负荷,而商南县和卢氏县等地,耕地多处于地势平坦的地区,肥料利用率相对较高,从而使化肥施用负荷相对较小。城固县为全国粮油基地,以粮食作物和油料作物为主,必然导致较大的化肥施用负荷,而神农架林区为国家级自然保护区,以旅游业和林业为主,其化肥施用负荷较小。十堰市和安康市的汉滨区

等地^[3,30]降水充分、气候适宜且城市人口较多,农产品主要供给附近的地级城市,产业结构以粮食、蔬菜和水果等化肥用量较大的经济作物为主,农民采用大量施肥的方式提高作物产量,从而导致化肥施用负荷较高。宁陕县、紫阳县和镇坪县等地处秦巴山区腹地^[32],交通不便,经济落后,用于购买化肥的资金有限,从而导致这些地区化肥施用负荷较小。此外,调查发现城固县、洋县、勉县、浙川县和西峡县等地农业经营模式以传统粗犷方式为主,化肥施用方式为地表施固体颗粒肥,有机肥施用普及率较低,缺乏新型专业技术,当地农民以增加施肥量来弥补肥料利用率低、损耗大的缺陷。

3.2 水源地化肥施用环境风险评价及防控措施

研究结果显示,水源地各地区化肥施用环境风险等级整体处于中等风险和低风险状态,氮肥施用整体处于中等风险状态,磷肥施用风险整体处于低风险和尚安全状态,这与庞振凌等^[33]关于水源地水质处于污染状态和中营养状态的研究结果相符,与刘钦普^[27]关于河南省南阳市化肥施用风险处于中等风险水平的研究结果一致,表明该评价模型能真实地反映水源地化肥施用的环境风险。与山东省^[12]、江苏省^[20]和河南省^[27]比,水源地化肥施用低风险地区相对较多,这主要是由于山东、江苏和河南为粮食和蔬果生产大省,其依靠大量的化肥投入换取较高的作物产量,而水源地处于山区,经济相对落后,化肥投入相对较少,但形式仍然不容乐观。此外,研究结果显示,水源地氮肥施用处于风险状态,氮肥施用量大的地区土壤酸化严重,其营养元素的流失易导致水体污染^[15],因此,相关部门应采取有效措施加以控制。

通过模型评价可知,风险指数呈逐年增加趋势,2002—2014年间增幅为10.45%,且环境风险地域差异明显,部分地区形势极为严峻,这与学者关于山东省^[12]、江苏省^[20]和河南省^[27]的研究结果一致。这与水源地人民环保意识水平、经济现状、施肥技术、自然条件、农业政策和经营体制等多方面原因密切相关^[11,24]。为管控和降低化肥施用的环境风险,笔者建议当地政府从体制、政策、技术和观念等多角度入手,开展有效措施发展环保农业,减少农业面源污染。例如:建立水源地土壤化肥含量检测、管理信息系统,对水源地化肥施用现状进行实时监控;鼓励土地流转,实行农业集约化经营,有效提高耕地和化肥的利用效率,同时鼓励农民种植需肥少、经济价值高的作物,在保证经济收入的前提下减少化肥施用量;调整种植结构,采

取田间轮作套种以增加地表覆盖、提高化肥利用率,合理安排粮食作物与经济作物的种植比例,在农田外围种植林地过滤带;调整土地利用方式,在坡度较大的地区修建梯田,平缓耕地坡度,减少水土流失较严重的耕地面积;普及推广配方施肥、测土施肥和水肥耦合技术,制定合理的氮、磷、钾施用比例;鼓励研发、生产和使用有机肥料;推广生态农业,建设“田-畜-沼-特”等生态循环农业模式;以讲座或传单等形式加强环保意识和农技知识教育,提升农民的科学施肥技术;制定相关环保类法律法规。从而达到“控量增效”的目的,确保化肥施用的环境安全。

4 结论

(1)化肥施用环境风险模型能客观地反映水源地化肥施用的环境风险。

(2)2002—2014年水源地化肥施用总量和单位耕地面积化肥施用负荷呈逐年增加趋势,且各地区间存在差异,其平均化肥施用强度远超发达国家化肥施用安全标准上限、全国化肥施用强度平均水平和我国生态县建设化肥施用负荷标准。

(3)2002—2014年水源地整体化肥施用风险程度处于中等风险水平,风险指数呈逐年增加趋势,形势严峻,且各地区间风险程度存在差异,出现严重风险的地区有西峡县、城固县、汉滨区和邓州市,出现中等安全状态的地区仅有宁陕县和神农架林区。

(4)水源地化肥施用负荷较大是由自然、经济、政策、技术和传统观念等多方面原因造成的,有关部门应采取有效措施加以管控。

参考文献:

- [1] Wang Q B, Halbrendt C, Johnson S R. Grain production and environmental management in China's fertilizer economy[J]. *Journal of Environmental Management*, 1996, 47(3):283-296.
- [2] 杜 军, 杨培岭, 李云开, 等. 不同灌期对农田氮素迁移及面源污染产生的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1):66-74.
DU Jun, YANG Pei-ling, LI Yun-kai, et al. Effect of different irrigation seasons on the transfer of N in different types farmlands and the non-point pollution production[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1):66-74.
- [3] US Environmental Protection Agency. Non-point source pollution from agriculture[EB/OL]. [2017-06-19]. http://water.epa.gov/polwaste/nps/agriculture/agmm_index.cfm.
- [4] Lena B V. Nutrient preserving in riverine transitional strip[J]. *Journal of Human Environment*, 1994, 3(6):342-347.
- [5] 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君, 等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(4):81-84.
- LI Xiu-fen, ZHU Jin-zhao, GU Xiao-jun, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4):81-84.
- [6] Fischer G, Winiwarter W, Ermolieva T, et al. Integrated modeling framework for assessment and mitigation of nitrogen pollution from agriculture: Concept and case study for China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 136(1/2):116-124.
- [7] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [8] Velthof G L, Oudendag D, Witzke H P, et al. Integrated assessment of nitrogen losses from agriculture in EU-27 using MITERRA-EUROPE[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(2):402-417.
- [9] 栾 江, 仇焕广, 井 月, 等. 我国化肥施用量持续增长的原因分解及趋势预测[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(11):1869-1878.
LUAN Jiang, QIU Huan-guang, JING Yue, et al. Decomposition of factors contributed to the increase of China's chemical fertilizer use and projections for future fertilizer use in China[J]. *Journal of Natural Resource*, 2013, 28(11):1869-1878.
- [10] Xin L J, Li X B, Tan M H. Temporal and regional variations of China's fertilizer consumption by crops during 1998—2008[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(4):643-652.
- [11] 李仲春. 我国农业面源污染现状及防治对策[J]. *现代农业科技*, 2012, 14(23):275-276.
LI Zhong-chun. Present situation and prevention countermeasures for agricultural non-point pollution in China[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012, 14(23):275-276.
- [12] 刘钦普, 林振山, 周 亮. 山东省化肥使用时空分异及潜在环境风险评价[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7):208-214.
LIU Qin-pu, LIN Zhen-shan, ZHOU Liang. Spatio-temporal differentiation and environmental risk assessment of fertilization in Shandong Province, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7):208-214.
- [13] 钱晓雍, 沈根祥, 郭春霞, 等. 基于水环境功能区划的农业面源污染源解析及其空间异质性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2):103-108.
QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang, GUO Chun-xia, et al. Source apportionment and spatial heterogeneity of agricultural non-point source pollution based on water environmental function zoning[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2):103-108.
- [14] 尹 岩, 梁成华, 杜立宇, 等. 有机肥对稻田土壤磷素潜在环境风险的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(2):11-16.
YIN Yan, LIANG Cheng-hua, DU Li-yu, et al. Potential environmental risk of phosphorus in paddy soil as affected by organic fertilizer[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(2):11-16.
- [15] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(7):1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 Century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1008-1017.
- [16] 徐 谦. 我国化肥和农药非点源污染状况综述[J]. *农业生态环境*,

- 1996, 12(2):39-43.
- XU Qian. A review on the status of non-point source pollution of chemical fertilizer and pesticide in China[J]. *Rural Eco-Environment*, 1996, 12(2):39-43.
- [17] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1):96-101.
- YANG Lin-zhang, FENG Yan-fang, SHI Wei-ming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1):96-101.
- [18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [19] 陈乾坤, 刘涛, 胡志新, 等. 江苏省西部湖泊表层沉积物中重金属分布特征及其潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5):1044-1050.
- CHEN Qian-kun, LIU Tao, HU Zhi-xin, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from the lakes of west Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):1044-1050.
- [20] 刘钦普. 江苏氮磷钾化肥使用地域分异及环境风险评价[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5):1477-1483.
- LIU Qin-pu. Regional difference of NPK fertilizers application and environmental risk assessment in Jiangsu Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5):1477-1483.
- [21] 刘钦普. 淮河流域化肥施用空间特征及环境风险分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(9):1512-1518.
- LIU Qin-pu. Distribution and environmental risk assessment of fertilizer application on farmland in Huai River Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(9):1512-1518.
- [22] 高永年, 高俊峰. 南水北调中线工程对汉江中下游流域生态环境影响的综合评价[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1):59-64.
- GAO Yong-nian, GAO Jun-feng. Comprehensive assessment of eco-environment impact of the South-to-North Water Transfer Middle Route Project on the middle-lower Hanjiang River Basin[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(1):59-64.
- [23] 裴亮, 刘慧明, 莫家玉, 等. 南水北调中线工程农业非点源污染源及控制措施[J]. 生态经济, 2011(6):164-167.
- PEI Liang, LIU Hui-ming, MO Jia-yu, et al. Countermeasures and origin against agricultural non-point pollution prevention in the Middle Route Project of the South-to-North Water Transfer[J]. *Ecological Economy*, 2011(6):164-167.
- [24] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18):3596-3605.
- LIU Qin-pu. Distribution of fertilizer application and its environmental risk in different provinces of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18):3596-3605.
- [25] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价[J]. 环境科学, 2013, 34(1):108-115.
- ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in soil of relocation areas from the Danjiangkou reservoir[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1):108-115.
- [26] 刘远书, 高文文, 侯坤, 等. 南水北调中线水源区生态环境变化分析研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3):440-446.
- LIU Yuan-shu, GAO Wen-wen, HOU Kun, et al. Analysis of ecological environment change on watershed of the Middle Route of South-North Water Diversion Project[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(3):440-446.
- [27] 刘钦普. 河南省化肥施用强度地理分布及其环境风险评价[J]. 河南农业科学, 2014, 43(6):66-70.
- LIU Qin-pu. Regional distribution and environmental risk assessment of chemical fertilizer rate in Henan Province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(6):66-70.
- [28] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发丹江口库区及上游地区经济社会发展规划的通知[EB/OL]. (2012-10-16). http://dqs.ndrc.gov.cn/qygh/201211/t20121109_513442.html.
- National Development and Reform Commission. Circular of the National Development and Reform Commission on printing and distributing the economic and social development plan of the Danjiangkou reservoir area and the upper reaches[EB/OL]. (2012-10-16). http://dqs.ndrc.gov.cn/qygh/201211/t20121109_513442.html.
- [29] 毛小冬, 刘阳生. 国内外环境风险评价研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(3):266-273.
- MAO Xiao-dong, LIU Yang-sheng. Current progress of environmental risk assessment research[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(3):266-273.
- [30] 姜世英, 韩鹏, 贾振邦, 等. 南水北调中线丹江口库区农业面源污染PSR评价与基于GIS的空间特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11):2153-2162.
- JIANG Shi-ying, HAN Peng, JIA Zhen-bang, et al. Evaluation with PSR model and GIS analysis of agricultural non-point source pollution in Danjiangkou reservoir of the Mid-Route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(11):2153-2162.
- [31] 沈泽昊, 张全发, 岳超, 等. 南水北调中线水源区土地利用/土地覆被的空间格局[J]. 地理学报, 2006, 61(6):633-644.
- SHEN Ze-hao, ZHANG Quan-fa, YUE Chao, et al. The spatial pattern of land use/land cover in the water supplying area of the Middle-Route of the South-to-North Water Diversion(MR-SNWD) Project[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(6):633-644.
- [32] 罗庆, 樊新生, 高更和, 等. 秦巴山区贫困村的空间分布特征及其影响因素[J]. 经济地理, 2016, 36(4):126-132.
- LUO Qing, FAN Xin-sheng, GAO Geng-he, et al. Spatial distribution of poverty village and influencing factors in Qinba Mountains[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(4):126-132.
- [33] 庞振凌, 常红军, 李玉英, 等. 层次分析法对南水北调中线水源区的水质评价[J]. 生态学报, 2008, 28(4):1810-1819.
- PANG Zhen-ling, CHANG Hong-jun, LI Yu-ying, et al. Analytical hierarchy process(AHP) evaluation of water quality in Danjiangkou reservoir: Source of the Middle Line Project to Transfer Water from South to North, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4):1810-1819.