

龚世飞, 丁武汉, 肖能武, 等. 丹江口水库核心水源区典型流域农业面源污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12): 2816–2825.

GONG Shi-fei, DING Wu-han, XIAO Neng-wu, et al. Characteristics of surface runoff and agricultural non-point source pollution in the core water source area of the Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12): 2816–2825.

丹江口水库核心水源区典型流域农业面源污染特征

龚世飞¹, 丁武汉², 肖能武^{1,3}, 郭元平¹, 叶青松^{1,3}, 王 巍¹, 李 虎^{2*}

(1. 十堰市农业科学院, 湖北 十堰 442000; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 长江大学主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心, 湖北 荆州 434025)

摘 要:为分析丹江口库区农业地表径流及其水质污染特征, 识别流域水质污染风险变量, 探究主要潜在污染物时空排放规律, 估算流域污染负荷并分析污染物来源贡献, 应用因子分析方法, 通过周年常规监测, 对核心水源区典型小流域的地表径流及其水质污染特征进行了分析, 并探讨了其时间差异性。同时采用平均浓度法估算了流域内面源污染负荷量和各污染源类型对主要潜在因子负荷的贡献率。结果表明: 流域内水体浊度、色度及流量在上游与下游间存在显著差异, 总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、pH和电导率在不同监测断面间差异不显著; TN、TP、COD和流量是影响库区水质、造成污染风险的主要潜在因子; 5—9月, 随着降雨量和流量的增加, 同步出现农业面源污染排放高峰。流域内, 上、中、下游流域监测断面TN年负荷量分别为4.94、11.04、20.43 t, TP年负荷量分别为0.17、0.50、0.68 t, COD年负荷量分别为29.02、68.78、118.27 t。农业生产及生活对TN贡献较大, 规模化养殖对TP贡献较大, 二者联合对COD负荷贡献率达到76%。研究表明, 大量氮磷随水土流失进入水体是引起小流域面源污染负荷偏高的主要原因, 加大对农业生活区和规模化畜禽养殖的控制管理, 构建植被缓冲带等减少水土流失措施, 对有效防治丹江口核心水源区典型小流域的面源污染具有重要作用。

关键词: 农业面源污染; 地表径流; 流失特征; 丹江口库区

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)12-2816-10 doi:10.11654/jaes.2019-0288

Characteristics of surface runoff and agricultural non-point source pollution in the core water source area of the Danjiangkou Reservoir

GONG Shi-fei¹, DING Wu-han², XIAO Neng-wu^{1,3}, GUO Yuan-ping¹, YE Qing-song^{1,3}, WANG Wei¹, LI Hu^{2*}

(1. Shiyan Academy of Agricultural Sciences, Shiyan 442000, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: Our objectives in this paper were to: analyze the characteristics of surface runoff and water quality pollution in the Danjiangkou Reservoir area; identify the risk variables of basin water quality pollution and explore the temporal and spatial discharge rules of major potential pollutants; estimate the basin pollution load and analyze the contribution of pollutant sources. Based on annual routine monitoring, we analyzed the characteristics of surface runoff and water quality in a typical small watershed by using factor analysis. Average pollutant concentration was used to estimate the non-point source pollution load and the contribution rate of each source type to the main potential factor load. The results showed that there were significant differences in water turbidity, color, and flow between upstream and downstream basin water bodies. There were no significant differences among different monitoring sections in total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD), ammonium (NH₄⁺-N), nitrate (NO₃⁻-N), pH, and flow. TN, TP, COD, and flow rate were the main factors

收稿日期: 2019-03-18 录用日期: 2019-06-26

作者简介: 龚世飞(1990—), 男, 湖北十堰人, 硕士, 研究方向为农业资源利用与环境保护。E-mail: gongsfsf@163.com

*通信作者: 李 虎 E-mail: lihu0728@sina.com

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016015); 湖北省技术创新重大专项(2018A BA 097)

Project supported: Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS(CAAS-XTCX2016015); Special-funds for Key Project of Technical Innovation of Hubei Province(2018A BA 097)

affecting the risk of water quality pollution in the reservoir area. With increased rainfall and flow, the agricultural non-point source pollution emission peak occurred between May and September. In the basin, the annual TN loads in the upper, middle, and lower reaches were 4.94, 11.04 t, and 20.43 t, respectively; the annual TP loads were 0.17, 0.50 t, and 0.68 t, respectively; and the annual COD loads were 29.02, 68.78 t, and 118.27 t, respectively. Agricultural production and life had large contributions to TN (accounting for 46%), while large-scale farming had a major contribution to TP (accounting for 46%). Both contributed 76% of the COD load. It is concluded that the large amount of nitrogen and phosphorus associated with water and soil loss into the water body was the main reason for the high surface area pollution loads in small watersheds. Strengthening the control and management of agricultural living areas and reducing soil erosion by constructing riparian vegetation buffers significantly reduced the Danjiangkou non-point source pollution.

Keywords: agricultural non-point source pollution; surface runoff; loss characteristics; Danjiangkou Reservoir region

面源污染因具有多源性、随机性、广域性、难以监测性等特点,受到行业学者和管理部门的广泛关注。研究表明,面源污染已经成为水体污染的重要污染源,甚至是首要污染源^[1]。有学者指出在未来几十年,如何更好地控制面源污染将是我国水环境保护和农村地区最主要的问题之一^[2-3]。全国第一次污染源普查公报显示,农业源总氮、总磷的排放量分别占排放总量的57.2%和67.4%。农业生产中不合理的作物种植和畜禽养殖行为,是导致流域内大量氮、磷素随降雨和径流进入水体,引起水域生态系统功能弱化的关键因素^[4-7]。2017年中国水资源公报显示,我国约21.5%的河流水质在Ⅵ类及以下;参与评价的117个湖泊和1038座水库中,约有76.9%的湖泊和27.1%的水库处于富营养化状态^[8]。有预测指出,如果不加大治理力度,我国农业面源污染将进一步加剧,污染排放的分散化趋势将给治理工作带来更大挑战^[9]。

丹江口库区位于我国南水北调中线工程源头,是生态功能极重要区和生态环境极敏感区。国务院2017年批准的《丹江口库区及上游水污染防治和水土保持“十三五”规划》(以下简称《规划》)目标是库区水质长期稳定达到国家地表水环境质量标准(GB 3838—2002)Ⅱ类水标准,降低库区农业面源污染对保障水质安全达标意义重大。在该区关于农业面源污染的研究主要集中在生态环境风险评价^[1,10]、小流域污染物时空分布特征及入库通量估算^[11-14]、面源污染消减技术^[15-16]等方面;此外,随着中线工程正式运行,新增消落区不同土地利用方式下土壤养分分布及释放特征^[17-19]也成为学界关注的热点。然而丹江口库区流域面源污染来源众多,形成机理复杂,当前的研究多是从较大尺度对农业面源污染进行评价,而对小流域污染特征的解析则主要围绕单一种植区、单一养殖区或者特定降雨季节展开,关于库区典型种养结合小流域农业面源污染的周年时空异质性、主导污染

因子识别及污染物输出负荷量化描述等还需要进一步的分析和探究。本文以丹江口库区典型农业小流域——谭家湾小流域为例,通过实地采样、降雨径流监测,结合室内分析和模型计算,识别库区农业地表径流及其水质污染特征,探究污染物的时空分布及其变化规律,估算流域污染负荷并分析污染物来源贡献,以期为丹江口库区农业面源污染的控制 and 环境保护管理决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以湖北省十堰市郧阳区谭家湾小流域为研究对象,该流域位于鄂豫陕三省边沿(32°25'N, 110°07'E),汉江上游下段,是国家级生态循环农业示范区。流域总面积5.5 km²,海拔800 m。流域属北亚热带大陆性季风气候,年平均气温13~16℃,年平均日照时数1655~1958 h,无霜期224~255 d。年平均降水量829 mm,径流深263.4 mm。一年内干湿季节分明,70%以上的年降雨集中在5—10月,11月至次年4月为干季,雨量稀少。

1.2 布点及采样方案

在流域内设置上、中、下游3个农业面源污染监测断面(图1),开展长期定位监测,取样点坐标分别为上游:32°55'34"N, 110°52'55"E;中游:32°55'29"N, 110°51'50"E;下游:32°55'12"N, 110°50'52"E。流域内各土地利用类型在流域内的占比见图2。上游主要为防护林和用材林,控制面积1.64 km²;中游与上游之间以规模化循环养殖业为主,伴有少量经济林发展,控制面积1.38 km²;流域主要农业用地及生活区位于下游与中游之间,控制面积1.57 km²。

1.3 样品分析方法

2018年1—12月对上述断面进行监测。无降雨状态下,在每月1—5日进行样品采集;如遇降雨则在

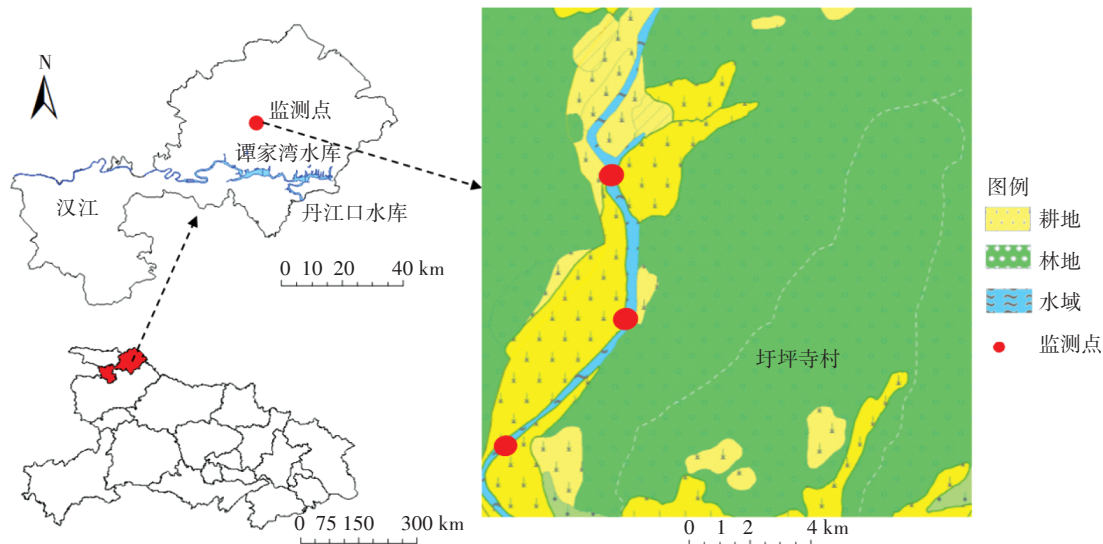


图1 谭家湾小流域位置图

Figure 1 The location of Tanjiawan watershed

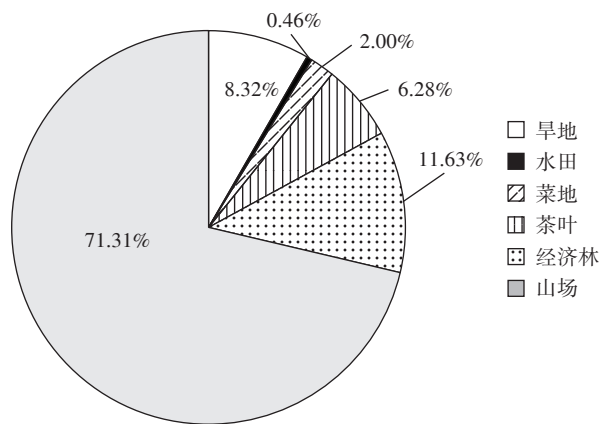


图2 谭家湾流域土地利用类型

Figure 2 Land use information in the Tanjiawan watershed

降雨后加测一次。样品采集过程中,严格按照水文监测技术规范同步记录水量、水质指标。水量指标包括降雨量、监测断面面积、水位、流速和流量。水位采用标尺测量,断面面积为同一时刻多个水位均值与拦河坝宽度的乘积,流速采用信控流速仪(XHW-1型)测定,流量为流速与断面乘积。河流采样按照《水质采样技术指导》(HJ 494—2009)^[20]进行。水质分析指标包括pH、电导率、浊度、色度、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、化学需氧量(COD)。样品采集时,将有机玻璃定深采水器(WB-PM)放至河道中,根据采样点水深,采集二分之一水深处的水样500 mL,每个点位取3组平行样,将水样放到预先准备好的水样瓶中,并根据分析项目,贴上

标签,添加H₂SO₄固定,4℃冷藏保存,带回室内分析,分析方法按照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[21]进行。

1.4 流域面源污染负荷及其来源分析

本文基于十堰市郧阳区谭家湾小流域上、中、下游3个农业面源污染监测断面的实测水文水质资料,应用平均浓度法^[22]估算污染物非点源浓度与非点源负荷量。平均浓度法是根据有限的监测资料估算流域非点源污染年负荷量的简便而有效的方法,由估算所得各污染物非点源负荷量与总负荷量之比得到非点源负荷所占比重^[23],进而分析谭家湾小流域的面源污染负荷及其来源构成^[24]。

平均浓度法:根据各次降雨径流过程的水量、水质同步监测资料,先计算每次暴雨洪水的各种污染物非点源污染的平均浓度,再以各次暴雨产生的径流量为权重,求出加权平均浓度近似作为地表径流的平均浓度,与地表径流之积为面源污染负荷量。假定年地表径流的平均浓度近似等于多场暴雨的加权平均浓度,则面源污染年负荷量(W_n)为^[22]:

$$W_n = C_{sm} \times W_s$$

式中: C_{sm} 为地表径流污染物平均浓度,mg·L⁻¹; W_s 为地表径流总量,m³。

1.5 数据处理

采用Excel 2010和DPS 7.05软件包进行数据整理分析,采用LSD(Lest-Significant Difference)法检验数据间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 流域水质污染特征

水质污染特征见表1。不同监测断面间的水体浊度、色度及流量变化趋势一致,自上而下逐步增加,下游与上游间存在显著差异($P<0.05$),这与下游人为活动干扰及断面控制面积的增加有关;其他污染指标在不同空间尺度上变化趋势不明显且各监测断面间差异不显著。参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[25],各监测点TN平均质量浓度均已超过Ⅳ类水标准($\leq 1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);TP平均质量浓度接近Ⅱ类水标准($\leq 0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); NH_4^+-N 和COD的平均质量浓度保持在较低水平,均不超过Ⅰ类水标准($\text{NH}_4^+-\text{N}\leq 0.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{COD}\leq 15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); NO_3^--N 的平均质量浓度则远低于水源地标限制($\leq 10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

2.2 流域水质污染风险变量分析

应用因子分析方法识别面源污染主效因子,不同监测断面水质污染特征的因子分析特征向量、特征值和方差累积贡献率如表2所示。选取pH、电导率、浊度、色度、流量、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TP和COD等10个与水质关系密切的指标进行因子分析。依据特征值大于1的要求,提取前3个主因子做因子载荷分析,用以评估该流域面源污染风险,即F1、F2、F3,其累计贡献率为82.178%,能较好地反映原始数据的基本信息。

在影响水质的因子中,F1的贡献率为31.538%,其中TP所占的因子载荷较大,且与F1呈较强的正相关,主要代表了水体中P的含量;F2贡献率为27.133%,其中COD、流量所占的因子载荷较大,且均与F2呈正相关关系,主要表征水体中COD含量水平及地表径流量;F3贡献率为23.462%,主要代表水体中TN含量。总体来看,TN、TP、COD以及流量是引起该流域农业面源污染风险的主要潜在变量。在分析

表2 单位特征向量、特征值和方差累计贡献率
Table 2 Unit eigenvector, eigenvalue and variance cumulative contribution rate

指标 Index	F1	F2	F3
TN	-0.045	0.210	0.966
NH_4^+-N	0.022	0.048	0.181
NO_3^--N	0.030	-0.059	-0.029
TP	0.876	0.277	-0.232
COD	0.247	0.822	0.417
pH	-0.035	0.005	0.049
电导率 Conductance	0.464	-0.328	0.314
浊度 Turbidity	-0.346	0.159	0.333
色度 Chromaticity	-0.353	-0.020	0.242
流量 Flow	-0.051	0.872	-0.202
特征值 Eigenvalue	3.056	2.761	2.409
贡献率 Rate/%	31.583	27.133	23.462
累计贡献率 Contribution rate/%	31.583	58.716	82.178

该流域水质污染特征时,应着重关注TN、TP、COD以及流量变化,以降低该流域农业面源污染风险。

2.3 流域农业面源污染时空排放规律

流域内上、中、下游3个监测断面主要污染源周年时空排放特征如图3~图5所示。由图可见,各断面COD、TN、TP浓度随流量变化同步波动,且变化趋势基本保持一致,其中COD的浓度变化比TN和TP剧烈得多。COD浓度变幅在 $6\sim 15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,5月份当流量达到最大值时出现浓度高峰。TN浓度长期稳定在 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,1—4月上、中、下游平均浓度分别为 1.34 、 $1.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;5—9月随着地区降雨量增多,流量增大,TN含量均不同程度升高并维持在较高水平,上、中、下游平均浓度依次为 2.22 、 $2.54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;此后浓度逐渐趋于稳定。TP含量随流量变化波动幅度相对较小,全年保持在 $0.5\sim 1.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,但依然在5—9月出现了相对高峰,

表1 流域水质指标统计描述

Table 1 Statistical description of water quality indicators in the basin

断面 Section	pH	电导率 Conductance/ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	浊度 Turbidity/NTU	色度 Chromaticity/PCU	流量 Flow/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
上游 Upstream	7.54±0.26a	0.62±0.03a	4.32±2.03b	10.83±6.76b	0.09±0.14b
中游 Midstream	7.61±0.24a	0.60±0.04a	6.95±3.53ab	18.87±8.09ab	0.20±0.11ab
下游 Downstream	7.62±0.13a	0.61±0.04a	10.25±6.55a	23.52±12.26a	0.36±0.12a
断面 Section	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^--\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
上游 Upstream	1.74±0.51a	0.09±0.05a	1.23±0.34a	0.06±0.02a	10.22±2.32a
中游 Midstream	1.75±0.72a	0.12±0.08a	1.16±0.42a	0.08±0.03a	10.90±2.35a
下游 Downstream	1.80±0.64a	0.11±0.06a	1.26±0.37a	0.06±0.02a	10.42±2.20a

注:数值表示方法为均值±标准差,同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: The numerical expression is mean standard deviation. Different letters in the same column show significant difference ($P<0.05$).

上、中、下游平均浓度分别达到 0.08、0.11 mg·L⁻¹ 和 0.10 mg·L⁻¹,其他时段的TP 含量则相对较低。

2.4 流域面源污染负荷估算及来源构成分析

不同监测断面水质污染特征的因子分析结果表明,引起流域农业面源污染的主要因素是TN、TP、COD 以及流量,应用平均浓度法估算 TN、TP 和 COD

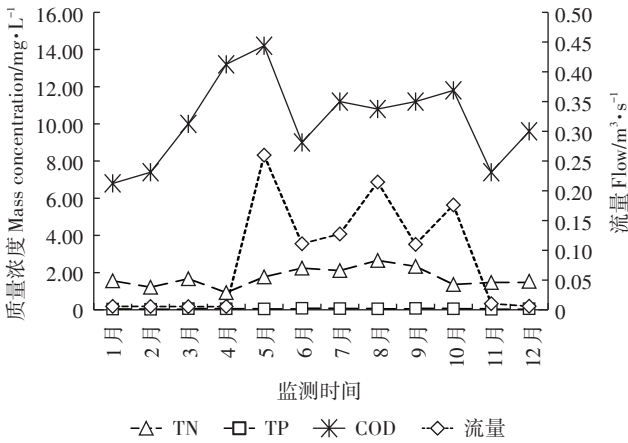


图3 流域上游污染物排放特征

Figure 3 Emission characteristics of pollutants in the upper reaches of the basin

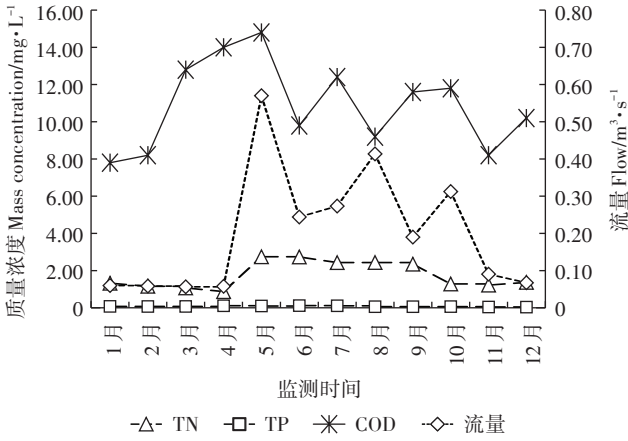


图4 流域中游污染物排放特征

Figure 4 Emission characteristics of pollutants in the middle reaches of the basin

污染负荷量见表3。上、中、下游流域监测断面TN 年负荷量分别为 4.94、11.04、20.43 t;TP 年负荷量分别为 0.17、0.50、0.68 t;COD 年负荷量分别为 29.02、68.78、118.27 t。流域内上、中、下游土地利用类型差别明显,上游主要为林地,中游主要为规模化循环养殖业,下游主要为农业用地及生活区。根据不同流域区间土地利用类型和污染源年均负荷量,分析流域各土地利用类型对流域污染物的贡献。从TN 负荷上来看(图6),农业及生活区对TN 贡献最大,为46%,规模化养殖区和林地贡献依次为30%和24%。从TP 负荷上来看(图7),规模化养殖对TP 的贡献将近一半,农业及生活区和林地贡献分别为26%和25%。农业及生活和规模化养殖对COD 贡献较大,分别为42%和34%,林地贡献率为24%(图8)。综合来看,减轻流域面源污染负荷,应加大对农业及生活区和规模化养殖的控制管理。

3 讨论

3.1 流域面源污染水质特征分析

丹江口核心水源区典型小流域的农业面源污染

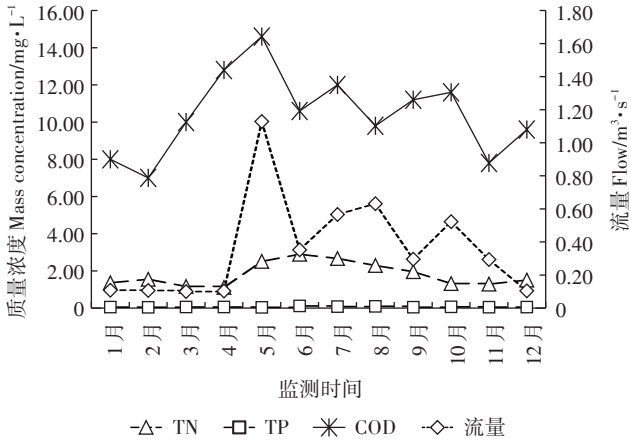


图5 流域下游污染物排放特征

Figure 5 Emission characteristics of pollutants in the lower reaches of the basin

表3 流域面源污染负荷估算

Table 3 Estimation of non-point source pollution load in watershed

断面 Section	年径流量 Annual runoff/10 ⁶ m ³	TN		TP		COD	
		浓度 Concentration/mg·L ⁻¹	负荷量 Load/t·a ⁻¹	浓度 Concentration/mg·L ⁻¹	负荷量 Load/t·a ⁻¹	浓度 Concentration/mg·L ⁻¹	负荷量 Load/t·a ⁻¹
上游	2.84	1.74	4.94	0.06	0.17	10.22	29.02
中游	6.31	1.75	11.04	0.08	0.50	10.90	68.78
下游	11.35	1.80	20.43	0.06	0.68	10.42	118.27

监测结果显示,随着自上而下流域控制面积的不断扩大,上、下游在浊度、色度和流量表现上出现显著差异;水体pH、电导率以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 的污染水平差异不显著。流域TN含量周年保持较高水平,虽然监测断面间的差异不显著,但浓度均值变化趋势总体依然表现为下游>中游>上游。N污染程度在较高水平上的相对提升,说明中游和下游因为畜禽养殖、农化产品投入和农村生活排污等行为导致大量相对浓度更高的N进入水体。与上、中游相比,中、下游间N浓度提升幅度随着流量增加不降反升,则说明在该区

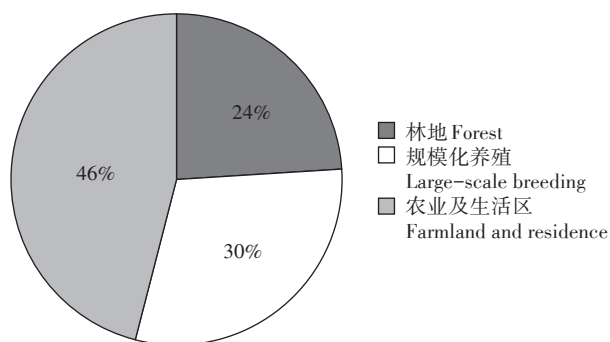


图6 年均TN负荷饼状比例图

Figure 6 The pie chart of TN load

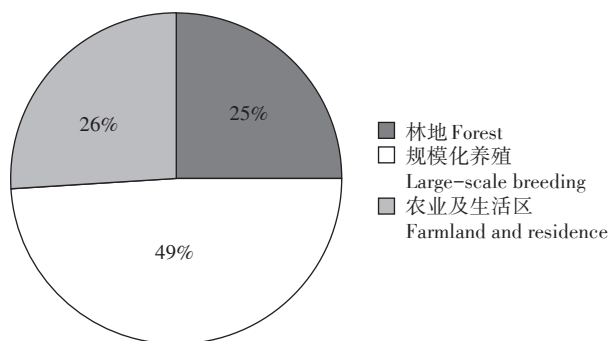


图7 年均TP负荷饼状比例图

Figure 7 The pie chart of TP load

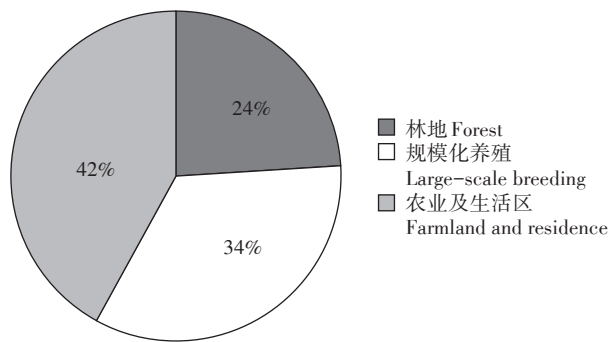


图8 年均COD负荷饼状比例图

Figure 8 The pie chart of COD load

间内N含量的陡增完全掩盖了径流的稀释作用。相关研究指出,长期以来水源地化肥施用明显过量且呈逐年增加趋势^[10],研究区下游蔬菜种植面积较大且多紧邻岸边,加之农户绿色生产意识淡薄,单纯追求高产导致种植业中持续高强度化肥投入是大量N流失的根本原因^[26]。TP和COD的平均质量浓度变化区间相对较小,且以中游含量为最高,说明畜禽养殖是导致区域P污染和COD升高的主要原因,下游水体P和COD的污染强度伴随降雨径流的稀释作用而有不同程度的降低。导致流域农业面源污染的主要污染负荷包括TN、TP、COD和流量变化,与前人研究结果基本吻合^[27]。其中TP的时空分异性较弱,而TN和COD含量随流量变化波动明显。分析原因可知,谭家湾小流域化肥施用大部分集中在4月和10月进行,虽然该时段土壤扰动较大,但该时期丹江口库区降雨较少,径流发生频率较低,较缓的河水流速会削弱垂直方向的水交换,有利于养分和泥沙的沉积^[28],因此面源污染流失速率相对较低。5—9月是库区降雨强度较大的时期,该时期小流域农化产品输入强度相对较小,但随着丰水期地表径流强度的增加,大量N和有机污染物随水土流失被冲刷进入水体,导致TN和COD流失速率大幅度提升,流域面源污染季节排放特征与三峡库区基本一致^[29]。流量是小流域雨水丰枯度的综合表征因子,直接影响养分浓度^[30],流量的大小通常与降雨和径流强弱同步出现,与污染物流失量^[31]和流域水质指标^[32]呈显著正相关,反映了区域降雨对面源污染的驱动作用。

3.2 面源污染负荷总量估算及不同污染类型贡献分析

目前针对流域面源污染负荷估算的方法或模型有很多,不同方法估算得到的污染负荷量也差别较大。杜娟等^[24]认为输出系数法计算结果较平均浓度法大,原因是输出系数法没有考虑到流域输移损失等因素的影响,其结论得出在考虑流域输移损失后,二者计算结果可以达到较高吻合度。由于本研究小流域监测断面总跨度仅有6.7 km,流域控制面积也仅有5.5 km²,所以采用平均浓度法分别对流域内各监测断面TN、TP和COD负荷量进行估算,同时在进行估算时只考虑了流域内的主要土地利用类型。已有的研究表明,农田种植和畜禽养殖是TN、TP负荷的主要贡献源^[33],且猪粪中氮磷养分含量明显高于鸡粪和羊粪^[34]。研究区以生猪养殖和种植业为主,本研究得出农业生产及生活对TN贡献较大,主要是因为农业生产与生活区人口密度大,而且伴随农业生产活动,农

业氮肥大量施用^[35],导致农业生产和生活成为TN的主要来源;由于流域规模化养殖数量相对较多但处理技术较为落后,畜禽粪便及养殖过程中排放的污染物未经处理或简单堆放后排入水体^[33],极大提高了TP的污染风险;二者一起对COD负荷贡献率能达到76%。卢少勇等^[36]研究得出在洞庭湖不同类型污染源中,旱地对TN贡献最高,林地对TN贡献最低,畜禽养殖对TP贡献最高,其他学者也得到类似结论^[37-38]。但是任玮等^[39]在对宝象河流域的计算中得出畜禽养殖对TP的贡献要低于其他类型。可见流域内的地形地貌、水文、气候、土壤特征、土地利用结构、植被、管理措施以及人类活动等都会造成流域间污染负荷的显著差异^[40]。值得注意的是,谭家湾小流域林地对TN、TP和COD的贡献率较高,介于24%~34%之间,与前人研究结果不尽相同^[17]。小流域林地污染负荷偏高主要是由于水土流失现象严重,大面积面源污染随土壤侵蚀进入水体^[41]。退耕还林、水库蓄水等因素,使库区林地面积逐年增加且多为农田向林地转变^[42],新增林地土壤养分相对充足,使得林地成为小流域不可忽视的面源污染源;小流域林地面积较大,且植被覆盖多为面源污染消减效率较低的灌木^[14],不利于营养成分的赋存;此外,小流域内林地主要分布在坡度较大区域等,均造成谭家湾小流域林地水土流失影响严重。

3.3 面源污染防治对策分析

总体来看,南水北调中线工程水源地安全保障区水体TN含量周年内持续偏高,其中质量水平处于Ⅱ类区间的 NO_3^- -N是库区N流失的主要形态,约占TN含量的70%,说明水体中的氮化合物大部分已转化为稳定的硝酸盐氮,在不发生富营养化的情况下,不会影响饮用水安全。即使如此,如何削减水体中的N含量依然是今后库区农业面源污染防治工作中无法回避的关键问题。结合流域特征和前人关于库区水体N含量过高所做的研究分析^[43-45],流域内自然环境固氮能力较差、主要农作物的需肥量和投入强度较大、生产者环保意识较弱是导致N过度排放的主要原因。TP含量介于Ⅰ~Ⅱ类水之间,也需加以重视;而COD、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度相对较低,对农业面源污染的贡献比较有限。5—9月是农业面源污染发生的敏感期,由于地表径流携带更多的污染物进入水体,期间的农事操作,尤其是农化产品的使用应更加谨慎。相关研究表明,库区河岸缓冲带不同植被对径流量及TP的消减效果均表现为草本>灌草>灌木^[14],玉米地

采用覆膜栽培可显著降低氮素流失^[15]。樊庆铎^[46]等研究证实灌区旱改水增加氮磷污染;川中地区梨树-蔬菜复合系统对磷素有较强富集效应^[47];三峡库区坡耕地四边桑+等高桑+横坡垄作系统可明显减少氮磷流失^[48];丹江口库区坡耕地柑橘园套种三叶草、黑麦草和苕子均可降低氮磷流失^[49];此外,在红壤坡耕地利用反坡台阶^[50]、库区构建渗透坝^[51]均是削减氮磷负荷的有效手段。为达到丹江口库区农业经济持续向好发展和农业面源污染现状持续改善的双重目标,必须从“源-流-汇”层面针对性采取操作性较强的防控技术。通过测土配方确定环境安全阈值、水域周边种植密集型覆草带、宣传农业绿色生产理念等手段降低农业污染源投入;适度推进部分农田向果园转变、发展间作套种模式、加强养殖业环境管理、建立农村生活垃圾无害化处理机制等措施也是削弱污染强度的有效途径;此外,在环境风险敏感区,通过植被过滤带与缓冲带、配套水生植物和生态湿地等工程技术的耦合应用,也是一种有效的尾端处理思路。

4 结论

(1)丹江口核心水源区典型小流域内,水体浊度、色度及流量在上游与下游间存在显著差异。

(2)TN、TP、COD及流量是引起谭家湾小流域面源污染风险的主要潜在变量;5—9月是流域面源污染防治关键期。

(3)农业生产及生活对TN贡献较大,规模化养殖对TP贡献较大。

(4)大量氮磷随水土流失进入水体是引起小流域面源污染负荷偏高的主要原因,加大对农业生活区和规模化畜禽养殖的控制管理,是有效控制面源污染的重要途径。

参考文献:

- [1] 唐肖阳,唐德善,鲁佳慧,等.汉江流域农业面源污染的源解析[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2242-2251.
TANG Xiao-yang, TANG De-shan, LU Jia-hui, et al. Source apportionment of agricultural non-point source pollution in the Hanjiang river basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10):2242-2251.
- [2] Shen Z Y, Liao Q, Hong Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 84(2):104-111.
- [3] Qiu, Jane. China vows to clean up rural environment[J]. *Nature*, doi: 10.1038/news.2011.200.
- [4] Ockenden M C, Deasy C, Quinton J N, et al. Evaluation of field wet-

- lands for mitigation of diffuse pollution from agriculture: Sediment retention, cost and effectiveness[J]. *Environmental Science & Policy*, 2012, 24:110-119.
- [5] 陆欣欣, 岳玉波, 赵 峥, 等. 不同施肥处理稻田系统磷素输移特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4):394-400.
- LU Xin-xin, YUE Yu-bo, ZHAO Zheng, et al. Phosphorus loss and migration characteristics in paddy field under different fertilization treatments[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(4):394-400.
- [6] Guo W, Fu Y, Ruan B, et al. Agricultural non-point source pollution in the Yongding River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 36:254-261.
- [7] Ma X, Li Y, Zhang M, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 412/413:154-161.
- [8] 中华人民共和国水利部. 2017年中国环境状况公报[R/OL]. [2018-11-16]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>
- Ministry of Water Resources of the PRC. China environmental status bulletin 2017[R/OL]. [2018-11-16]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/>
- [9] 马国霞, 於 方, 曹 东, 等. 中国农业面源污染物排放量计算及中长期预测[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2):489-497.
- MA Guo-xia, YU Fang, CAO Dong, et al. Calculation of emission of diffused pollution and its long-term forecast in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2):489-497.
- [10] 房珊瑚, 杨 珺, 强艳芳, 等. 南水北调中线工程水源区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.
- [11] 汉 强, 于兴修, 王 伟, 等. 丹江口库区典型小流域农业非点源污染物输出特征[J]. 土壤通报, 2016, 47(2):445-460.
- HAN Qiang, YU Xing-xiu, WANG Wei, et al. Output feature of agricultural non-point source pollutants in the typical small watershed of Danjiangkou Reservoir area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(2):445-460.
- [12] 王书航, 王雯雯, 姜 霞, 等. 丹江口水库水体氮的时空分布及入库通量[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7):995-1005.
- WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, et al. Spatial and temporal distribution and flux of nitrogen in water of Danjiangkou Reservoir[J]. *Research of Environmentalism Science*, 2016, 29(7):995-1005.
- [13] 雷 沛, 曾祉祥, 张 洪, 等. 丹江口水库农业径流小区土壤氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3):44-48.
- LEI Pei, ZENG Zhi-xiang, ZHANG Hong, et al. Nitrogen and phosphorus loss characteristics from agricultural runoff plots in the Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3):44-48.
- [14] 王国重, 李中原, 左其亭, 等. 丹江口水库水源区农业面源污染物流失量估算[J]. 环境科学研究, 2017, 30(3):415-422.
- WANG Guo-chong, LI Zhong-yuan, ZUO Qi-tong, et al. Estimation of agricultural non-point source pollutant loss in catchment area of Danjiangkou Reservoir[J]. *Research of Environmentalism Science*, 2017, 30(3):415-422.
- [15] 孙东耀, 全 川, 纪钦阳, 等. 不同类型植被河岸缓冲带对模拟径流及总磷的消减研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6):2393-2399.
- SUN Dong-yao, TONG Chuan, JI Qin-yang, et al. Reduction of simulated runoff and total phosphorus in different vegetation riparian buffer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6):2393-2399.
- [16] 王 伟, 于兴修, 汉 强, 等. 丹江口库区覆膜耕作土壤氮素流失随夏玉米生长期的变化[J]. 环境科学, 2016, 37(11):4212-4219.
- WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, et al. Change of soil nitrogen leaching with summer maize growing period under plastic film mulched cultivation in Danjiangkou Reservoir area, China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(11):4212-4219.
- [17] 尹 炜, 朱 惇, 雷俊山, 等. 丹江口水库典型消落区不同土地利用类型土壤养分分布[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7):1185-1191.
- YIN Wei, ZHU Dun, LEI Jun-shan, et al. Distribution of nutrient, phosphorus in the soils of different land uses from the representative water-level-fluctuating zone of Danjiangkou Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7):1185-1191.
- [18] 曾祉祥, 雷 沛, 张 洪, 等. 丹江口水库典型消落区土壤氮磷赋存形态及释放特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5):1383-1392.
- ZENG Zhi-xiang, LEI Pei, ZHANG Hong, et al. Nitrogen and phosphorus fractions and releasing characteristics of the soil from the representative water-level-fluctuating zone of Danjiangkou Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5):1383-1392.
- [19] 毛亮军, 王 渊, 王新生, 等. 丹江口水库消落带不同作物类型的土壤总氮分析[J]. 中国农学通报, 2018, 34(8):72-82.
- MAO Liang-jun, WANG Yuan, WANG Xin-sheng, et al. Soil total nitrogen of different crop types in Danjiangkou Reservoir hydro-fluctuation belt[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(8):72-82.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. 水质 采样技术指导 HJ 494—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Ministry of Environmental Protection of PRC. Water quality—Guidance on sampling techniques HJ 494—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:701-705.
- State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:701-705.
- [22] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4):397-400.
- LI Huai-en. Mean concentration method for estimating non-point source pollution load and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4):397-400.

- [23] 李怀恩, 丁 劲, 王 莉. 沔河控制断面非点源污染年际变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 18-23.
LI Huai-en, DING Jing, WANG Li. Research on interannual variation characteristics of non-point source pollution on control section of Fenghe River[J]. *Journal of Water Research & Water Engineering*, 2016, 27(2): 18-23.
- [24] 杜 娟, 李怀恩, 李家科. 基于实测资料的输出系数分析与陕西沔河流域非点源负荷来源探讨[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 827-837.
DU Juan, LI Huai-en, LI Jia-ke. Analysis on export coefficients based on measured data and study on the sources of non-point load on Fenghe River watershed in Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 827-837.
- [25] 国家环境保护总局. 中华人民共和国地表水环境质量标准 GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Environmental quality standards for surface water GB 3838—2002[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [26] 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 and Environment*, 2010, 136(1/2): 116-124.
- [27] 朱媛媛, 田进军, 李红亮, 等. 丹江口水库水质评价及水污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 139-147.
ZHU Yuan-yuan, TIAN Jin-jun, LI Hong-liang, et al. Water quality assessment and pollution profile identification of Danjiangkou Reservoir, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 139-147.
- [28] Yang Z J, Liu D F, Ji D B, et al. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2010, 53(4): 1114-1125.
- [29] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 138-146.
HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus emission in the Gufu River small watershed of the Three Gorges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1): 138-146.
- [30] Ma X, Li Y, Li B, et al. Nitrogen and phosphorus losses by runoff erosion: Field data monitored under natural rainfall in Three Gorges Reservoir area, China[J]. *CATENA*, 2016, 147: 797-808.
- [31] 范晓娟, 张丽萍, 邓龙洲, 等. 我国东南典型侵蚀区坡地磷素流失机制模拟研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2409-2417.
FAN Xiao-juan, ZHANG Li-ping, DENG Long-zhou, et al. Study on the mechanism of slope phosphorus loss in the typical erosion area in southeast China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(6): 2409-2417.
- [32] 李发荣, 邱学礼, 周 璟, 等. 滇池东南岸农业和富磷区入湖河流水表径流及污染特征[J]. 中国环境监测, 2014, 30(6): 93-101.
LI Fa-rong, QIU Xue-li, ZHOU Jing, et al. Surface runoff and pollutants characteristics of inflowing rivers in the agricultural and phosphorus-rich region on the southeast coast of the Lake Dianchi[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(6): 93-101.
- [33] 王 萌, 王敬贤, 刘 云, 等. 湖北省三峡库区 1991—2014 年农业非点源氮磷污染负荷分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 294-301.
WANG Meng, WANG Jing-xian, LIU Yun, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus pollution loads from agricultural non-point sources in the Three Gorges Reservoir of Hubei Province from 1991 to 2014[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 294-301.
- [34] 李书田, 刘荣乐, 陕 红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179-184.
LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179-184.
- [35] 方怒放, 史志华, 李 璐. 基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(4): 7-12.
FANG Nu-fang, SHI Zhi-hua, LI Lu. Application of export coefficient model in simulating pollution load of non-point source in Danjiangkou Reservoir area[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(4): 7-12.
- [36] 卢少勇, 张 萍, 潘成荣, 等. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2278-2286.
LU Shao-yong, ZHANG Ping, PAN Cheng-rong, et al. Agricultural non-point source pollution discharge characteristics and its control measures of Dongting Lake[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(6): 2278-2286.
- [37] 李 娜, 韩维峰, 沈梦楠, 等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 224-230.
LI Na, HAN Wei-zheng, SHENG Meng-nan, et al. Load evaluation of non-point source pollution from reservoir based on export coefficient model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 224-230.
- [38] 徐立红, 陈成广, 胡保卫, 等. 基于流域降雨强度的氮磷输出系数模型改进及应用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 159-166.
XU Li-hong, CHEN Cheng-guang, HU Bao-wei, et al. Improvement of export coefficient model for N and P based on rainfall intensity and its application[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 159-166.
- [39] 任 玮, 代 超, 郭怀成. 基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2400-2408.
REN Wei, DAI Chao, GUO Huai-cheng. Estimation of pollution load from non-point source in Baoxiang watershed based, Yunnan Province on improved export coefficient model[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(8): 2400-2408.
- [40] 应兰兰, 侯西勇, 路 晓, 等. 我国非点源污染研究中输出系数问题[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 90-95, 99.
YING Lan-lan, HOU Xi-yong, LU Xiao, et al. Discussion on the export coefficient method in non-point source pollution studies in China[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(6): 90-95, 99.
- [41] 胡硯霞, 黄进良, 杜 耘, 等. 2000—2015 年丹江口库区植被覆盖

- 时空变化趋势及其成因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 27(4):862-872.
- HU Yan-xia, HUANG Jin-liang, DU Yun, et al. Spatial-temporal trends of vegetation coverage and their causes in the Danjiangkou Reservoir region during 2000 to 2015[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 27(4):862-872.
- [42] 李学敏, 文力, 刘琛, 等. 丹江口水库库区及周边地区水土流失空间分布特征及影响因素[J]. 湖南农业科学, 2018(9):54-59.
- LI Xue-min, WEN Li, LIU Chen, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil and water loss in Danjiangkou Reservoir Area and surrounding areas[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018(9):54-59.
- [43] 殷明, 施梅芳, 刘成付. 丹江口水库水质总氮超标成因初步分析及控制对策[J]. 环境科学与技术, 2007, 7(13):35-36.
- YIN Ming, SHI Mei-fang, LIU Cheng-fu. Causes and control measures of total nitrogen in Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 7(13):35-36.
- [44] 陈静, 丁卫东, 焦飞, 等. 丹江口水库总氮含量较高的调查分析[J]. 中国环境监测, 2005, 21(3):54-57.
- CHEN Jing, DING Wei-dong, JIAO Fei, et al. Analysis of high content of total-nitrogen in Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(3):54-57.
- [45] 宋国强, 张卫东, 殷明, 等. 丹江口水库总氮监测与综合分析[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(11):140-142.
- SONG Guo-qiang, ZHANG Wei-dong, YIN Ming, et al. Monitoring and comprehensive assessment of total nitrogen in Danjiangkou Reservoir[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(11):140-142.
- [46] 樊庆铤, 孟婷婷, 李金梦, 等. 江川灌区旱田改水田加剧水体氮磷污染[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12):79-85.
- FAN Qing-xin, MENG Ting-ting, LI Jin-meng, et al. Changing from dry field to paddy field intensify water pollution by nitrogen and phosphorus loads in Jiangchuan irrigation area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(12):79-85.
- [47] 徐波, 朱雪梅, 刘倩, 等. 川中丘陵区不同土地利用方式下土壤养分特征研究——以中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站小流域为例[J]. 西南农业学报, 2011, 24(2):663-668.
- XU Bo, ZHU Xue-mei, LIU Qian, et al. Study on nutrient characteristics of soils under different land utilization types in hilly area of central Sichuan basin: A case study in the small river valley of Yanting purple soil agricultural ecosystem experiment station[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(2):663-668.
- [48] 谢雪东, 倪九派, 周川. 三峡库区坡耕地农桑系统对径流拦截和氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5):66-69.
- XIE Xue-dong, NI Jiu-pai, ZHOU Chuan. Effects of configuration mode of corp-mulberry system in slope cropland on runoff interception and nitrogen and phosphorus in Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5):66-69.
- [49] 李太魁, 张香凝, 寇长林, 等. 丹江口库区坡耕地柑橘园套种绿肥对氮磷径流流失的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2):94-98.
- LI Tai-kui, ZHANG Xiang-nin, KOU Chang-lin, et al. Effects of green manure planting on nitrogen and phosphorus losses along with runoff from citrus orchards on sloping land in the Danjiangkou Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2):94-98.
- [50] 王帅兵, 宋娅丽, 王克勤, 等. 不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13):160-169.
- WANG Shuai-bing, SONG Ya-li, WANG Ke-qin, et al. Effects of reverse-slope terrace on nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of red loam under different rainfall patterns[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13):160-169.
- [51] 宋志鑫, 宋刚福, 唐文忠, 等. 渗透坝对丹江口库湾水体氮磷负荷削减的应用[J]. 环境工程学报, 2019, 13(1):88-94.
- SONG Zhi-xin, SONG Gang-fu, TANG Wen-zhong, et al. Application of permeable dam on nitrogen and phosphorus load reduction in the bay of Danjiangkou Reservoir[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13(1):88-94.