

基于输出系数模型的1998—2016年洱海流域磷素时空变化特征分析

韦晓雪, 李晓琳, 郑毅

引用本文:

韦晓雪, 李晓琳, 郑毅. 基于输出系数模型的1998—2016年洱海流域磷素时空变化特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 171–181.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0389>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

汉江流域农业面源污染的源解析

唐肖阳, 唐德善, 鲁佳慧, 常文倩, 唐新

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2242–2251 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1751>

农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评估研究——以淮河流域为例

宋大平, 左强, 刘本生, 邹国元, 刘东生

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1219–1231 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1374>

湖北省三峡库区1991—2014年农业非点源氮磷污染负荷分析

王萌, 王敬贤, 刘云, 李春蕾, 肖文发

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 294–301 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0600>

林芝市农业面源污染负荷时空变化与分布特征

郝守宁, 付意成

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1308–1315 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0499>

降雨径流对江淮丘陵区农业流域磷素输出影响研究

陆海明, 张丽, 王妞, 邹鹰

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2165–2173 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0097>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

韦晓雪, 李晓琳, 郑毅. 基于输出系数模型的1998—2016年洱海流域磷素时空变化特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 171–181.

WEI Xiao-xue, LI Xiao-lin, ZHENG Yi. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of phosphorus in Erhai Lake basin from 1998 to 2016 based on export coefficient model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 171–181.

基于输出系数模型的1998—2016年 洱海流域磷素时空变化特征分析

韦晓雪^{1,2}, 李晓琳³, 郑毅^{3*}

(1. 西南林业大学湿地学院, 昆明 650224; 2. 西南林业大学国家高原湿地研究中心, 昆明 650224; 3. 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224)

摘要:为分析1998—2016年洱海流域磷素时空变化特征,本研究通过输出系数模型计算1998、2005、2010、2016年洱海磷污染负荷,以细化磷污染来源。结果表明:1998—2016年,洱海总磷污染负荷总体呈上升趋势,具体表现为流域内点源污染增加、面源污染减少,但面源污染仍是主要污染源。其中,1998年洱海流域总磷污染负荷为390.273 t,2005年为402.150 t,2010年为398.879 t,2016年达到最高值429.451 t。农业面源、畜禽养殖粪便和城镇居民生活污水是洱海流域三大污染来源,其产生平均负荷分别占总磷污染负荷的48%、18%、15%。洱源县总磷污染负荷达205.608 t,大于大理市污染负荷。洱海子流域总磷单位面积负荷集中于86.027~540.519 kg·km⁻²·a⁻¹,其中子流域1~14变化明显。今后流域治理过程中可通过提高污水处理效率、实现畜禽粪便科学还田、合理施用化肥等方式,减少磷素向水体中的排放量,从而实现流域内磷素的合理循环。

关键词:洱海流域;点源污染;面源污染;输出系数模型;子流域

中图分类号:X592 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2020)01-0171-11 **doi:**10.11654/jaes.2019-0389

Analysis of temporal and spatial variation characteristics of phosphorus in Erhai Lake basin from 1998 to 2016 based on export coefficient model

WEI Xiao-xue^{1,2}, LI Xiao-lin³, ZHENG Yi^{3*}

(1. Wetlands College, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. National Plateau Wetlands Research Center, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 3. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to analyze the temporal and spatial variations of phosphorus in Erhai Lake basin from 1998 to 2016, the phosphorus pollution load in Erhai Lake in 1998, 2005, 2010, and 2016 was calculated by output coefficient model. The results show that from 1998 to 2016, the total phosphorus pollution load in Erhai Lake had an upward trend, in which the point source pollution in the basin increased while the nonpoint source pollution decreased. However, nonpoint source pollution is still the main source of pollution. The total phosphorus pollution load in Erhai Lake basin was 390.273 t in 1998, 402.150 t in 2005, and 398.879 t in 2010; the highest value was 429.451 t in 2016. Agricultural nonpoint sources, livestock and poultry manure, and domestic sewage of urban residents were the three major sources of pollution in Erhai Lake basin, accounting for an average of 48%, 18%, and 15% of the total phosphorus pollution load, respectively. The total phosphorus pollution load in Eryuan County is 205.608 t, which is larger than that in Dali City. The unit area load of total phosphorus in

收稿日期:2019-04-10 录用日期:2019-10-10

作者简介:韦晓雪(1994—),女,广西贵港人,硕士研究生,从事湿地环境地理研究。E-mail:929727232@qq.com

*通信作者:郑毅 E-mail:zhengyi-64@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0200200/007);国家自然科学基金项目(31460551);云南省应用基础研究计划青年项目(2017FD104);云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(0511311)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2017YFD0200200/007); The National Natural Science Foundation of China (31460551); The Youth Project of the Application Basic Research Program of Yunnan Province (2017FD104); The Construction Project of Key Discipline (Ecology) of Colleges and Universities of Yunnan Province (0511311)

the sub-basin of Erhai Lake is $86.027\sim 540.519\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, and the sub-basin 1~14 changes significantly. In future lake basin treatment, the discharge of phosphorus into water can be reduced by improving the efficiency of sewage treatment, realizing the scientific return of live-stock and poultry manure to the field, and the rational application of chemical fertilizers to realize the reasonable circulation of phosphorus in the basin.

Keywords: Erhai Lake basin; point source pollution; nonpoint source pollution; export coefficient model; sub-basin

洱海位于云南大理白族自治州境内,系云南省第二大高原淡水湖泊,具有供水、灌溉、渔业、航运、旅游等多种功能,在区域经济发展中发挥着重要作用^[1]。但由于洱海具有入湖河流源近流短、水体交换周期长、水量少等特征,使其富营养化状况日趋严重^[2]。20世纪90年代以来,洱海水质从Ⅱ类下降为Ⅲ类,主要水质指标尤其是总磷量呈增加趋势,区域经济增长与生态环境保护协调发展成为该区域可持续发展面临的重要问题^[3-4]。洱海富营养化是一个长期而缓慢的过程^[5]。近20年来,在国家重大水专项的支持下,地方政府制定了一系列洱海流域水环境保护治理规划(1996—2016),以期减少经济高速发展下洱海流域污染负荷,但近些年水环境污染依旧存在。因此,运用科学方法揭示长时间尺度下洱海流域磷素的时空分布规律,分析其存在的问题并提出对策,对于改善洱海水质、保护洱海流域水环境,实现洱海流域社会经济可持续发展具有现实的科学指导意义。

磷素的输入是导致洱海水质不断恶化的主要限制因子^[6]。农业生产与农村生活污染是流域环境污染的主要来源,二者对流域污染负荷贡献率在60%以上^[7-9]。流域内农业生产活动强度加大、化肥农药使用过量、农户散养畜禽粪便资源利用程度不高,使得农业面源污染急速增加^[10-12]。加上生产过程中磷素利用效率低的矛盾,导致盈余磷素在土壤内累积,或通过径流、淋溶、侵蚀进入水体,加剧了水体富营养化^[13]。富磷的农村生活污水和生活垃圾随意排放与丢弃,致使农村污染进一步加重^[14-15]。流域经济社会快速发展过程中,城镇入湖磷污染负荷逐年升高是导致洱海水质下降的另一重要原因,王圣瑞等^[16]研究发现洱海流域城镇污染存量,旅游污染快速增加,导致入湖河流水质提升困难。一方面人口数量持续上升,人类活动强度加大,导致流域污染干扰性增强^[17];另一方面快速城镇化进程中洱海流域城市建筑面积加大,水泥等不透水性下垫面增加,加快污水进入水体时间^[18-19]。然而目前综合考虑农村和城镇两大污染源的研究甚少,已有研究多涉及农村面源污染对洱

海水环境的影响,实际上忽略了城镇与农村不同污染来源的差异性及其对水环境的影响。

有学者从空间尺度对洱海流域农业面源污染分布情况进行了研究。如杜宝汉^[20]以区为单元估算了洱海流域农村非点源污染量,发现洱海西部与北部是污染重点控制区;翟玥等^[21]以乡镇为单元核算了洱海流域面源污染评价,发现对入湖贡献最大的乡镇是江尾、右所、三营、玉湖、凤仪和喜洲,约占流域污染负荷的65%。但已有研究多是基于大尺度污染物研究估算,具有空间异质性结果不够细致的缺点,导致难以区分各污染来源分布格局与定位高负荷敏感区及其污染类型^[22]。因此,为了保护洱海流域健康的水环境功能,有必要全面且细致地摸清洱海流域磷污染排放源,以子流域尺度估算洱海流域磷污染负荷。以子流域为单元估算洱海流域磷污染,有利于对洱海流域磷素污染提出因地制宜的精细化管理,从而实现减少流域磷素污染的目标。

本研究通过整理年鉴数据、挖掘文献资料、实地调研及监测等方式,将输出系数模型与ArcGIS相结合,精确分析洱海流域26个子流域在1998—2016近20年间总磷负荷时空分布特征,定量分析流域内农村和城镇区域的外源磷污染源结构,识别洱海流域重点污染源和污染区域,为今后洱海流域水环境保护提供科学依据和实践参考。

1 研究区概况

洱海流域位于大理白族自治州中部偏东位置,地跨大理市和洱源县两个区域($25^{\circ}30'\sim 26^{\circ}00'\text{N}$, $100^{\circ}00'\sim 100^{\circ}30'\text{E}$),流域总面积为 $2\,556.4\text{ km}^2$ 。洱海隶属澜沧江的分支水系,是云南高原上仅次于滇池的第二大高原湖泊。洱海流域主要进水河流为弥苴河、罗时江、永安江,位于洱海北部区域,唯一的出水口分布在西南地区的西洱河流域,湖水途经漾濞江最后汇入澜沧江。本文参照董利民^[23]的研究,依据流量汇流区并结合GIS将洱海流域划分为26个子流域,按照县级行政单元划分,子流域18~20辖属洱源县,其余子流域辖属大理市(图1)。

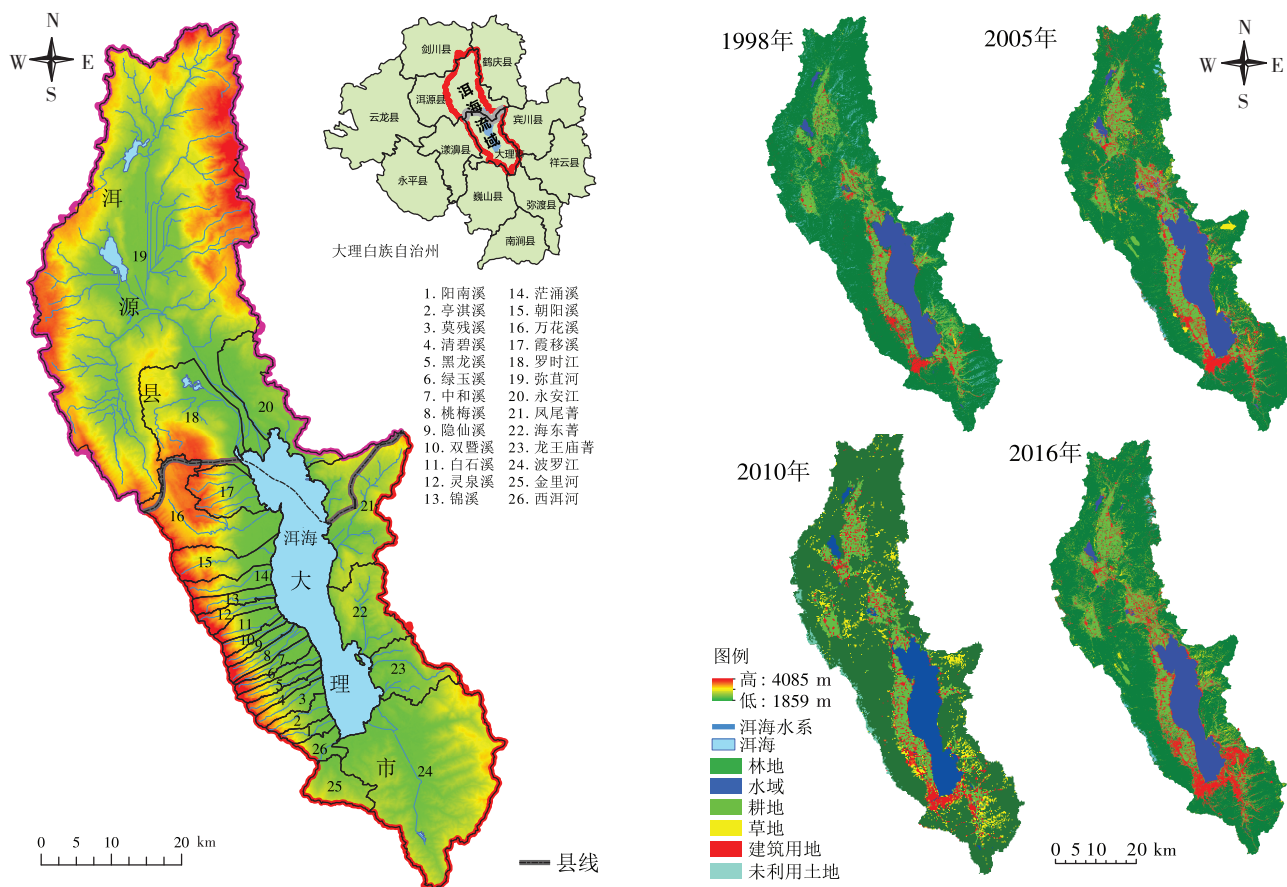


图1 洱海流域及土地利用

Figure 1 Watershed and land use in Erhai Lake basin

2 研究方法

本研究将洱海磷污染依照来源分为农村污染源与城镇污染源。农村污染源由农村生活、畜禽养殖粪便、林地磷淋洗以及农业面源污染组成;城镇污染源由城镇生活污水、建筑污染、工业污染和旅游污染构成。从入湖方式划分,又可分为点源和面源两种形式。农业面源污染是农业生产过程中过量施用化肥农药、畜禽粪便以及农村生活污染不合理排放等对农业以及农村环境造成的大范围污染,具有分散性、不确定性、隐蔽性和难测性的特点^[24]。传统意义上的农村生活污染是通过面源方式入湖,但相关研究表明:自20世纪90年代末期起,大理市政府已着手农村生活污水收集工作,农村污水收集率已从10%上升到80%以上。因此本研究认为,农村生活产生的废弃物和污水除了以传统方式还田外,还有部分是通过管道运输经过污水厂处理后以点源方式入湖^[25-26]。洱海流域内传统农户散养粪便污染与规模化养殖粪便污染并存,农户散养产生的粪便污染以面源方式入湖,

规模化养殖粪便污染通过布设污水处理设施以点源方式入湖。

人口与产业集聚作为洱海城镇化经济发展的重要特征,在洱海流域经济快速发展的同时也给洱海水环境带来恶劣影响^[27]。城镇居民增加和城镇面积扩张使得污水排放强度加大,加上处理设施落后,给水环境带来巨大压力^[28]。因此,由城镇居民生活与建设用地面积污染产生的污染问题是目前值得重视的环境问题。产业集聚意味着生产规模扩大,产量增加会促使污染大量排放,增加入湖负荷压力^[29-30]。当前,对于洱海环境污染的研究还多集中于工业领域,忽略了由旅游产业带来的污染。人口与产业集聚带来的污染负荷在入湖形式上也有一定的差别,其中城镇居民生活、工业污染、旅游污染经过系统污水处理后以点源方式入湖,建设用地污染以面源方式入湖(图2)。

2.1 模型方法

2.1.1 输出系数模型

输出系数模型是基于多元线性回归分析的数学模型,是借助污染物输出系数与土地利用等相关数据

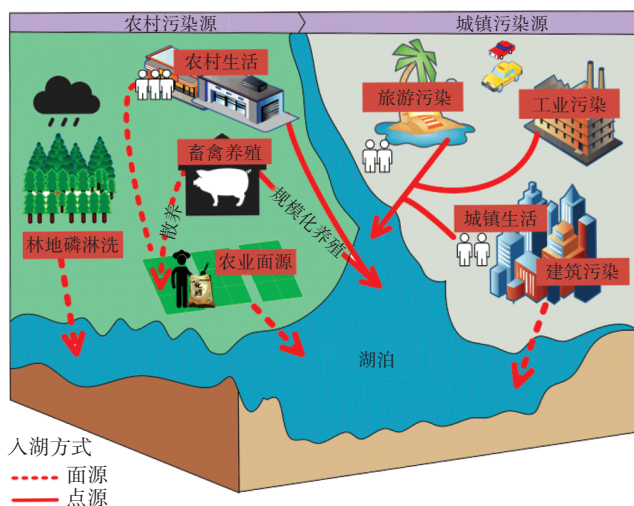


图2 污染负荷入湖机制

Figure 2 Mechanism of contamination load into lake

估算流域输出的面源污染负荷,主要用于评价土地利用和湖泊富营养之间的关系^[31]。输出系数模型经过改进后可用于计算各种来源的面源污染负荷,如土地利用类型、化肥施用、人口、牲畜的污染负荷^[32]。

一般的输出系数模型方程表达式为:

$$L_j = \sum_{i=1}^n (E_i \times A_i \times I_i) + P \quad (1)$$

式中: L_j 是磷污染在第 j 子流域总负荷量, $t \cdot a^{-1}$; i 是子流域中的土地利用类型,共有 n 种; E_i 是磷污染在第 i 种土地利用类型中的输出系数, $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,或第 i 种畜禽每头的排泄系数或每人的输出系数, $t \cdot a^{-1}$; A_i 是子流域中第 i 种土地利用类型的面积, km^2 ,或第 i 种畜禽数量,头,或是人口的数量,人; I_i 是指农业面源的入湖系数,或每头畜禽养殖的入湖系数,或每人的入湖系数, t ; P 是来自降水的输入污染物, $t \cdot a^{-1}$ 。

降雨负荷计算:

$$P = d \times a \times \lambda \quad (2)$$

式中: d 为研究区域单位面积上磷的沉降率, $kg \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$; a 为研究区域的面积, km^2 ; λ 代表径流系数。

2.1.2 其他污染负荷计算

在现实生活中,城市居民产生的生活污染、工业污水产生的污染以及旅游人口带来的污染都经过处理由管道直接排出,计算公式如下:

(1)城市居民生活污染计算

$$L_{j, \text{pop}} = \text{POP}_j \times \alpha_1 \times \beta_1 \times 365 \quad (3)$$

式中: $L_{j, \text{pop}}$ 是磷污染在第 j 子流域中城市居民生活产生的总磷污染负荷, $t \cdot a^{-1}$; POP_j 代表城市居民人口数

量,人; α_1 代表城市居民中每人每天磷污染物排放量, t ; β_1 是城市居民生活污染物入湖系数。

(2)产业污染计算

$$L_{j, i} = W_i \times \beta_i \quad (4)$$

式中: $L_{j, i}$ 是磷污染在第 j 子流域中第 i 类产业产生的总磷负荷, $t \cdot a^{-1}$; W_i 是第 i 类不达标工业污水排放量, $t \cdot a^{-1}$,或每年旅游人口数量,人; β_i 是第 i 类每吨不达标工业污水含磷量,或旅游人均磷污染排放量, g 。

2.2 数据来源

农村污染源数据:通过大理白族自治州统计年鉴、地方年鉴以及实际调查,得到洱海流域内1998、2005、2010、2016年的农村人口数量以及猪、大牲畜、羊、家禽等畜禽养殖数量^[33]。

城镇污染源数据:根据大理白族自治州统计年鉴、地方年鉴以及来自于污水处理厂及工业企业的废水排放直接统计,得到洱海流域内1998、2005、2010、2016年的城镇居民数量、旅游人口数量,以及不达标工业污水排放量^[34]。

土地利用数据:本文涉及的土地利用数据来源于地理空间数据云网站,共选用分辨率为30 m的洱海流域1998、2005、2010、2016年4幅遥感影像,经过人机交互目视解译得到耕地、草地、水域、建设用地、林地、未利用土地的面积。

2.3 参数选取

2.3.1 输出系数值

确定适合的输出系数是正确计算输入量的重点,近些年国内学者对输出系数已积累了大量研究。本研究通过查阅《生活源产排污系数及使用说明》以及相关文献,对比参考流域和研究流域的土地利用类型、经济发展程度,确定了洱海流域的土地利用类型及农村生活输出系数值^[23, 35-36](表1)。

2.3.2 畜禽排泄系数

社会经济快速发展,人们对畜禽肉类需求量增加,畜禽养殖数量不断增加,畜禽养殖排放的大量粪便对生态环境造成严重的压力^[37]。本研究通过文献分析比较^[23, 38-39],得到猪、大牲畜、羊、家禽的排泄系数,见表2。

表1 土地利用类型及农村生活输出系数值($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)Table 1 The export coefficient classification of TP in relevant basins($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)

耕地 Farmland	林地 Forestland	建设用地 Construction land	农村生活 Rural life
0.005 4	0.02	0.02	0.224

表2 畜禽排泄系数(g·a⁻¹)
Table 2 Animal excreta parameter

猪 Pig/头	大牲畜 Large livestock/头	羊 Sheep/头	家禽 Poultry/只
1.04	8.08	0.27	0.055

2.3.3 入湖系数

入湖系数是指污染物向流域出口输入与迁移过程中出现的入湖损失^[40]。结合洱海流域实际情况,本文参考相关的研究成果,确定的城镇生活、农村生活、畜禽养殖、农业面源入河系数,见表3^[41]。

2.3.4 其他数值

城市每人每天磷排放量为0.82 g,该数值来源于《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》^[42]。依据《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》,得出工业不达标污水每吨含磷量为0.005 g^[43]。畜禽粪便还田比例来源于农业农村部办公厅发布的《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》^[44]。农村生活废弃物及污水还田比例来源于前人研究成果^[45-47]。旅游人均磷污染排放量(0.7 g)、单位面积林地磷淋洗量(0.62 t·km⁻²)、单位建筑面积磷流失量(0.059 t·km⁻²)均参考已有文献数据^[23,48-49]。

3 结果与分析

3.1 1998—2016年洱海流域总磷污染负荷分析

洱海1998、2005、2010年和2016年的总磷污染负荷分别为390.273、402.150、398.879 t和429.451 t,污染负荷呈升高趋势(表4);但变化不均匀、不稳定,1998—2005年变化幅度中等,增幅为3.04%,2005—2010年变化幅度最小,降幅为0.82%,2010—2016年变化幅度最大,增幅为7.66%。研究区点源污染负荷呈显著上升趋势,从1998年的115.453 t上升至2016年的184.649 t,增幅59.93%;而流域内面源污染负荷与点源污染负荷趋势相反,呈下降趋势,从1998年的

274.820 t下降至2016年的244.803 t,降幅10.92%。1998—2016年研究区仍以面源污染为主,面源污染负荷占比分别为70.41%、67.31%、59.59%和57.00%,表明洱海流域面源污染逐年减少,点源污染增加。

3.2 洱海流域总磷污染源分析

由图3A可知,洱海点源污染负荷包括畜禽养殖、农村生活、城镇生活、工业污染以及旅游产业等污染负荷。1998—2016年农村生活、城镇生活、旅游产业和畜禽养殖污染负荷呈持续上升的状态,工业污染呈下降趋势。城镇生活污染是洱海点源污染最主要的来源,其中2005—2010年增长幅度最大,从54.648 t增长至71.292 t,增加了16.644 t,占城镇污染来源总增长比例的30%。与此同时,旅游产业污染在18年间也处于快速增长阶段,1998年旅游产业污染最小,对于整个洱海的影响仅为0.518 t,随着社会进步,旅游成为大众休闲活动之首,2016年旅游产业污染反超工业污水污染,成为洱海点源污染的第四大污染负荷。

图3B显示,洱海流域的面源污染负荷主要由农业面源、建筑污染、林地磷淋洗、畜禽养殖和农村生活污染等组成。农业面源占洱海面源污染负荷的75%,是洱海面源污染负荷最主要的污染源;在1998—2016年间,农业面源均值变化与林地磷淋洗均值变化趋势相同,呈先减少后增加趋势,而建筑污染与畜禽养殖污染则呈现出递增的趋势,农村生活污染出现递减趋势。总体上,农业面源从1998年的215.670 t下降至2016年的181.920 t,降幅为15.64%,说明研究区农业面源污染状况总体呈好转趋势,与耕地面积大量减少有关。

3.3 洱海流域总磷污染负荷空间分析

综合各期GIS数据的自然间断点,取150、215、285为总磷单位面积污染负荷的间断点,将子流域分为4级(图4)。由图4可知,洱源县内洱海流域总磷污染负荷贡献大,1998—2016年总磷污染负荷分别

表3 入湖系数
Table 3 River load ratio

	城镇生活 Town life	农村生活 Rural life	农业面源 Agricultural non-point source	畜禽养殖 Livestock and poultry breeding
总磷 Total phosphorus	0.03	0.1	0.1	0.1

表4 洱海流域总磷污染负荷(t)
Table 4 Total phosphorus pollution load in Erhai Lake basin(t)

项目 Item	1998年	2005年	2010年	2016年
点源污染负荷 Point source pollution load	115.453	131.431	161.177	184.649
面源污染负荷 Non-point source pollution load	274.820	270.719	237.702	244.803
总污染负荷 Total pollution load	390.273	402.150	398.879	429.451

为200.291、209.767、216.642、223.884 t, 占总负荷的50%以上, 主要污染源为农业面源污染、畜禽养殖污染。其次是大理市, 其总磷污染负荷所占比例均在45%左右, 主要污染源为农业面源污染、城镇生活污染、旅游污染以及工业污染等。依据单位面积负荷分

析, 洱源县单位面积总磷污染负荷多集中于0~150、150~215 $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 两个等级, 大理市的单位面积负荷多分布在215~285、285~545 $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 两个等级, 最高面积负荷集中分布在大理市北部区域。

各个子流域的总磷单位污染负荷空间格局差异

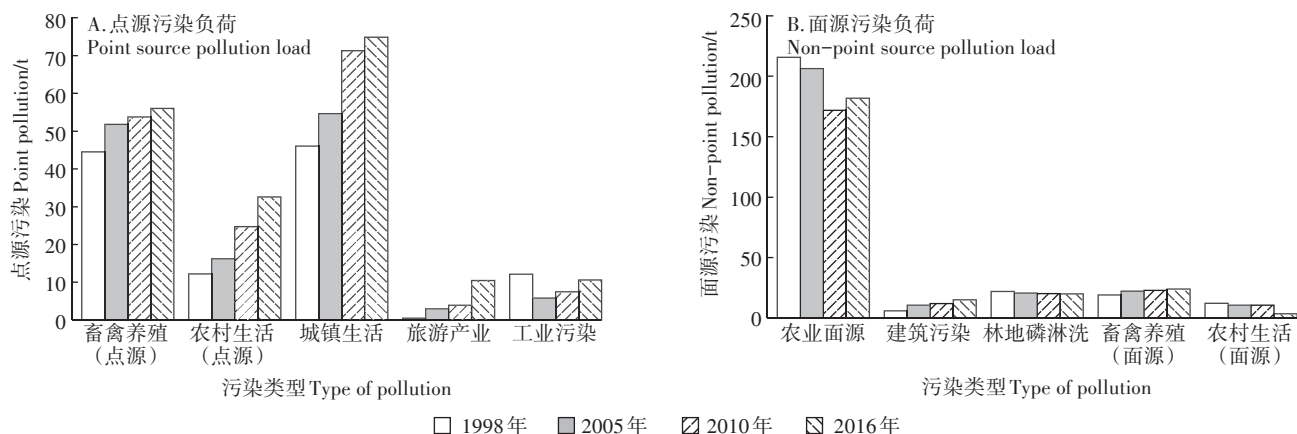


图3 洱海流域总磷污染

Figure 3 Total phosphorus pollution in Erhai Lake basin

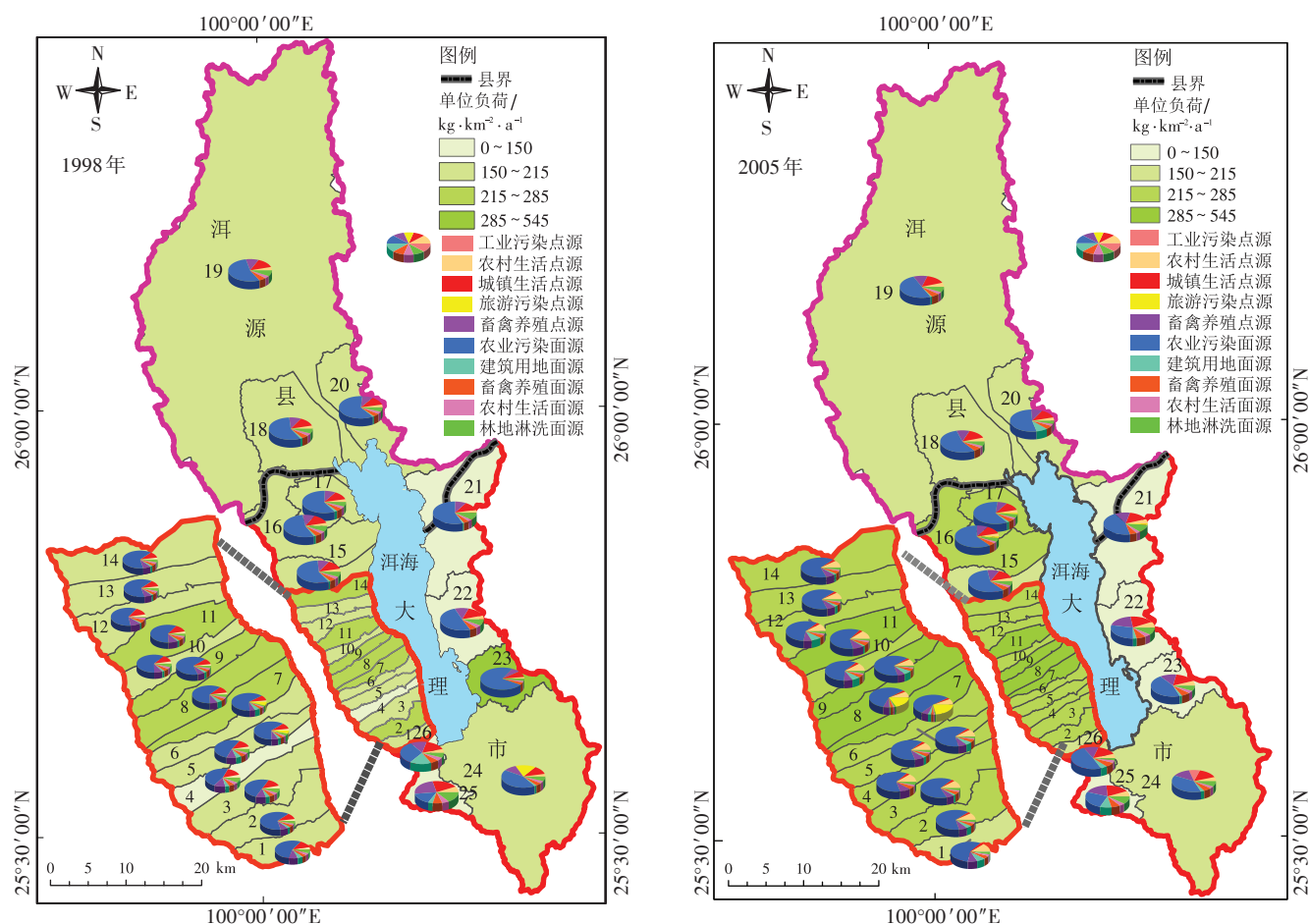
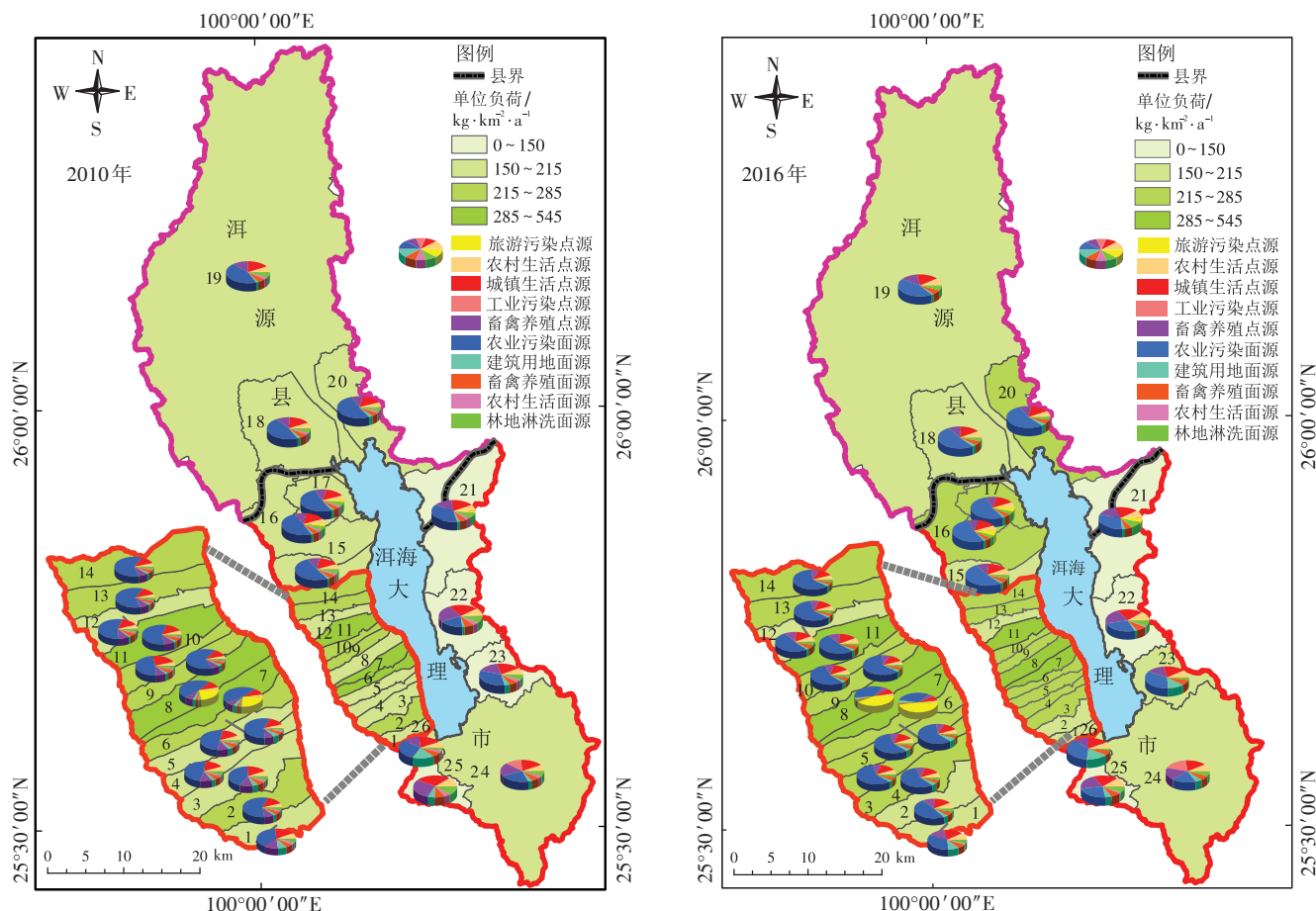


图4 1998—2016年子流域总磷污染负荷分布以及成分图

Figure 4 Distribution and composition chart of total phosphorus pollution load in sub-basin from 1998 to 2016



续图4 1998—2016年子流域总磷污染负荷分布以及成分图

Continued figure 4 Distribution and composition chart of total phosphorus pollution load in sub-basin from 1998 to 2016

很大,最高等级的单位污染负荷主要集中在1~14号子流域,而最低等级的子流域单位污染负荷多分布于21、22号子流域。1998—2016年,子流域7、8、9、11、14是空间分布上变化最大的污染单元,其总磷单位污染负荷范围从 $230.264 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 变为 $540.519 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,每个子流域平均增长速率约10%。此外,除20号子流域单位面积污染负荷的排名上升外,其他子流域变化幅度均不明显,而下降幅度最大的是23号子流域,从1998年的 $298.329 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 下降为2016年的 $164.893 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,主要原因是其农业面源污染贡献率逐年下降。

从子流域污染来源看,不同子流域间存在的污染源也各有差异。农业面源污染、畜禽养殖污染以及城镇居民带来的生活污染是洱海流域的主要污染源,三者污染负荷量之和占总污染负荷量的80%左右。以农业污染源为重点污染源的流域有18、20号子流域,占该流域总污染负荷的43%~50%;其次是畜禽养殖,主要集中在19号子流域;城镇生活污染则分布在流

域内人口较多的23、24、25、26号子流域;旅游污染产生较多的子流域为7、8号;工业污染分布于24号子流域,2010—2016年子流域7、8旅游污染开始大幅上升,并出现反超农业面源污染的趋势。

4 讨论

4.1 1998—2016年洱海流域入湖总磷污染时间分异特征

洱海流域农村-城镇系统的入湖总磷污染总量从时间上呈现明显的增加趋势,排放量从1998年的390.273 t增至2016年429.451 t,增加主要来源于点源污染负荷的增长,尤其是2005—2010年期间点源磷污染增长29.746 t,其增长速率最快。该时期内流域经济社会逐步向洱海周边发展,旅游人口向坝区聚集,但流域内大部分的自然村几乎没有污水收集处理设施,排水设施尚不完善,造成富含磷的养殖废水及农村生活污水直接排入河道。面源污染负荷虽然在1998—2016年期间逐渐减少,从274.820 t下降至244.803 t,但依然是总磷污染负荷的主要组成部分。

2005—2010年期间面源污染下降幅度最大,达到12%,这与洱海水环境治理“十五”规划中采取农业面源污染控制工程密切相关,通过实施农业面源污染减排技术与示范工程,有效减少了农田磷素的环境排放。

4.2 洱海流域入湖总磷污染源结构解析

1998、2005、2010、2016年洱海流域农业面源污染产生的入湖总磷污染总量分别为215.670、206.316、171.862、181.920 t,均占当年入湖总磷污染总量的40%以上,成为流域内最主要污染源。随着大蒜等高施肥作物市场需求量不断增长,洱海流域大蒜、蚕豆种植面积快速增长,流域内磷肥多年平均用量为 $6000\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$,是世界平均水平的2倍,导致化肥污染成为入湖总磷最主要的农业污染源^[47,50]。畜禽养殖污染源是流域内入湖总磷的第二大污染源,截至2016年,畜禽养殖产生的入湖总磷达到80.065 t,相比1998年增长了16.468 t,与周应良等^[51]研究结果相一致。洱海流域内洱源县是主要的奶牛和生猪养殖区,但受经济条件限制,该区域畜禽养殖方式极不合理,基本为家庭散户养殖且分布于流域内广大的农村区域,增加了畜禽粪便的处理难度^[52]。2016年生活污水排放带来的总磷点源污染为111.137 t,其中农村生活污水的总磷污染达36.247 t,该区域村落零星分散、房屋布局凌乱,生活过程中产生的废水很难采取城镇的管网统一收集并集中处理的方式,导致大量污水进入水体。此外城镇人口生活污染贡献了74.890 t的入湖总磷污染量,虽然当地政府部门采取“集中与分散处理相结合,以集中为主要处理手段”的原则,实施流域万吨级城镇污水收集管网、污水处理厂建设等,但是污水处理效率低的问题依然存在,导致城镇生活污水仍是入湖总磷污染的主要来源。

4.3 洱海流域入湖总磷污染空间分布特征

大理市所辖子流域总磷污染不仅负荷量大且呈现出“高负荷、多密集”的特点;而洱源县则以低等级污染负荷居多,大致为“低负荷”的特征。由污染来源看,在1998—2016年,大理市污染源以农业面源污染、城镇生活、旅游污染以及工业污染为主,其直接原因为洱海流域内湖滨缓冲区多集中于此,缓冲区内农田面积比例高、环湖旅游景点集中、城区人口密度大、污染源入湖距离短。对此,应加强收集缓冲区城镇和旅游污水,强化控制污染入湖,并修建缓冲区生态修复带,避免污染直接入湖。洱源县农业面源与畜禽养殖污染严重,应推进生态农业发展,减少农业化肥农药使

用量,做到测土配方施肥,畜禽养殖污染则应加强粪便污水收集以减少入湖污染负荷。

1998—2016年单位面积磷污染负荷在不同子流域间分布有较大的差异性,其中子流域7、8、9、11、14对总磷入湖污染输入量最大,年输入均值分别为 373.976 、 330.668 、 269.132 、 299.222 、 $251.453\text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。西部子流域7、8旅游污染较为严重,最大的污染源是旅游业污染,而西部其他子流域则以农业面源污染为主;南部的23、24、25、26号子流域是洱海城镇化发达区,城镇人口生活是主要污染源;北部的18、20号子流域农业种植污染尤为突出,而子流域19则以畜禽粪便污染为主。流域内土地利用方式、畜禽养殖规模、人口生活方式等差异是造成各子流域污染源结构不同的主要原因。西部、北部地区地势平坦,适宜于农业发展^[53]。西部与北部地区农田和草地资源丰富,以大蒜、蚕豆等高施肥量、高耗水作物种植为主并散养以奶牛为代表的大牲畜,造成该地区的农业面源污染和畜禽养殖污染问题突出。西部是流域内旅游风景集散地,截止2016年该区共产生旅游污染9 t,占洱海流域旅游总污染的85%,存在餐饮、客栈、旅游点污水难以集中处理的旅游污染问题,与翟玥等^[21]的研究结果一致。南部是流域的中心城区,1998—2016年该区共产生城镇污染10.491 t,城镇化程度发展水平高,人口密度大,污水处理厂的污水处理设施配套管网老旧以及污水处理率低等问题,使得城镇生活污水成为该区域磷素环境排放的主要来源。

本研究根据入湖总磷污染空间分布特征将洱海流域划分为4个治理分区:(1)化肥污染控制区(子流域9、11、14、18、20),控制大蒜、蚕豆等高耗肥作物种植面积,依据种植业生产资料平衡施用肥料,优化化肥与有机肥结构,并提高磷肥利用效率;(2)畜禽粪便污染控制区(子流域19),提倡规模化养殖大牲畜,全面收集零星养殖户畜禽粪便污水,并大力推进有机肥施用;(3)生活污染控制区(子流域23、24、25、26),建设专业化运营污水处理厂,加强污水管网建设与改造;(4)产业治理区(子流域7、8),全面加强工业污水处理和旅游业污水集中处理,提高产业污水去污效率。

5 结论

(1)1998—2016年洱海流域总磷污染负荷呈增加趋势,其中,面源污染是洱海总磷污染的主要来源,占总污染负荷的50%以上。

(2)源结构分析表明,点源污染负荷贡献率大小为城镇生活>畜禽养殖>农村生活>工业污染>旅游污染,面源污染负荷贡献量顺序为农业面源>畜禽养殖>林地淋洗>农村生活>建筑污染。其中,农业面源污染对子流域总磷污染负荷的贡献率最高,而畜禽养殖污染与城镇生活污染贡献率次之。

(3)空间分析表明,洱海流域总磷单位面积污染负荷整体呈现大理市高于洱源县特征,其中子流域7、8、9、11、14、18、20、23、24、25、26是单位面积污染负荷变化明显的区域,以旅游污染、农业面源污染、畜禽养殖污染以及城镇生活污染为主。根据磷素时空分布特征,对洱海流域实行分区治理:化肥污染控制区,提高磷肥利用率;畜禽粪便控制区,提倡规模化养殖畜禽;生活污染控制区,优化城乡布局,加强污水管网收集建设;产业治理区,优化排污设施,提高去污效率。

参考文献:

- [1] 于洋,张民,钱善勤,等.云贵高原湖泊水质现状及演变[J].湖泊科学,2010,22(6):820-828.
YU Yang, ZHANG Min, QIAN Shan-qin, et al. Current status and development of water quality of lakes in Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6):820-828.
- [2] 段昌群.高原湖泊治理是生态保护的关键[J].社会主义论坛,2017(5):19.
DUAN Chang-qun. Management of plateau lakes is the key to ecological protection[J]. *Socialism Forum*, 2017(5):19.
- [3] 倪兆奎,王圣瑞,金相灿,等.云贵高原典型湖泊富营养化演变过程及特征研究[J].环境科学学报,2011,31(12):2681-2689.
NI Zhao-kui, WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can, et al. Study on the evolution and characteristics of eutrophication in the typical lakes on Yunnan-Guizhou Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(12):2681-2689.
- [4] 马艳,董利民.洱海流域农村面源污染对水环境的影响及其控制对策[J].华中师范大学研究生学报,2011,18(1):150-153.
MA Yan, DONG Li-min. The influence on water environment of non-point source pollution in the countryside of Erhai basin and the controlling measures[J]. *Huazhong Normal University Journal of Postgraduates*, 2011, 18(1):150-153.
- [5] 袁旭音,许乃政,陶于祥,等.太湖底泥的空间分布和富营养化特征[J].资源调查与环境,2003,24(1):20-28.
YUAN Xu-yin, XU Nai-zheng, TAO Yu-xiang, et al. Spatial distribution and eutrophic characteristics of bottom sediments in Taihu Lake[J]. *Resources Survey & Environment*, 2003, 24(1):20-28.
- [6] 叶玉适,梁新强,李亮,等.不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J].环境科学学报,2015,35(4):1125-1135.
YE Yu-shi, LIANG Xin-qiang, LI Liang, et al. Effects of different water and nitrogen managements on phosphorus loss via runoff and leaching from paddy fields in Taihu Lake basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(4):1125-1135.
- [7] 唐海峰,杨昆.基于GIS与SWAT的洱海流域农业非点源污染模拟研究[J].安徽农业科学,2012,40(11):6747-6750.
TANG Hai-feng, YANG Kun. The simulation research on non-point source pollution in Erhai Lake watershed by using GIS and SWAT model[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(11):6747-6750.
- [8] 陈敏鹏,陈吉宁,赖斯芸.中国农业和农村污染的清单分析与空间特征识别[J].中国环境科学,2006,26(6):751-755.
CHEN Min-peng, CHEN Ji-ning, LAI Si-yun. Inventory analysis and spatial distribution of Chinese agricultural and rural pollution[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6):751-755.
- [9] 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.
- [10] 洪大用,马芳馨.二元社会结构的再生产——中国农村面源污染的社会学分析[J].社会学研究,2004(4):1-7.
HONG Da-yong, MA Fang-xin. Reproduction of dual social structure: A sociological analysis of rural non-point source pollution in China[J]. *Sociological Study*, 2004(4):1-7.
- [11] 李玉恒,刘彦随.中国城乡发展转型中资源与环境问题解析[J].经济地理,2013,33(1):61-65.
LI Yu-heng, LIU Yan-sui. Investigation of the resource & environment issues in the urban-rural transition in China[J]. *Economic Geography*, 2013, 33(1):61-65.
- [12] Tilt B. The politics of industrial pollution in rural China[J]. *The Journal of Peasant Studies*, 2013, 40(6):1147-1164.
- [13] 邱君.我国化肥施用对水污染的影响及其调控措施[J].农业经济问题,2007(增刊1):75-80.
QIU Jun. Effect of chemical fertilizer application on water pollution and its control measures in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2007(Suppl1):75-80.
- [14] 王永生,刘彦随.中国乡村生态环境污染现状及重构策略[J].地理科学进展,2018,37(5):710-717.
WANG Yong-sheng, LIU Yan-sui. Pollution and restructuring strategies of rural ecological environment in China[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(5):710-717.
- [15] 杨滨键,尚杰,于法稳.农业面源污染防治的难点、问题及对策[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(2):236-245.
YANG Bin-jian, SHANG Jie, YU Fa-wen. Difficulty, problems and countermeasures of agricultural non-point sources pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(2):236-245.
- [16] 王圣瑞,倪兆奎,席海燕.我国湖泊富营养化治理历程及策略[J].环境保护,2016,44(18):14-19.
WANG Sheng-rui, NI Zhao-kui, XI Hai-yan. Management process and strategy of lake eutrophication in China[J]. *Environmental Protection*, 2016, 44(18):14-19.
- [17] 高凤,邵美玲,曹昌丽,等.城镇化流域氮、磷污染特征及影响因

- 素——以宁波北仑区小浞江为例[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3): 689–699.
- GAO Feng, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, et al. Nitrogen and phosphorus pollution characteristics and influencing factors in urbanized watershed: A case study of Xiaojia River in Beilun District, Ningbo City[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(3): 689–699.
- [18] 张亚娟, 李崇巍, 胡蓓蓓, 等. 城镇化流域“源-汇”景观格局对河流氮磷空间分异的影响——以天津于桥水库流域为例[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2437–2446.
- ZHANG Ya-juan, LI Chong-wei, HU Bei-bei, et al. Impact of a “source-sink” landscape pattern in an urbanized watershed on nitrogen and phosphorus spatial variations in rivers: A case study of Yuqiao reservoir watershed, Tianjin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2437–2446.
- [19] 赵 鸿, 刘 媛, 李 婧. 基于河道治理的城市河流生态修复[J]. 西北水电, 2015(1): 12–15.
- ZHAO Hong, LIU Yuan, LI Jing. Ecological recovery of urban rivers based on river course treatment[J]. *Northwest Water Power*, 2015(1): 12–15.
- [20] 杜宝汉. 洱海流域水文特征及非点源污染负荷研究[J]. 环境科学导刊, 1991, 2(6): 25–33.
- DU Bao-han. Study on hydrological characteristics and non-point source pollution load in Erhai Lake basin[J]. *Environmental Science Survey*, 1991, 2(6): 25–33.
- [21] 翟 玥, 尚 晓, 沈 剑, 等. SWAT模型在洱海流域面源污染评价中的应用[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 666–671.
- ZHAI Yue, SHANG Xiao, SHEN Jian, et al. Application of SWAT model in agricultural non-point source pollution investigation in Lake Erhai watershed[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(6): 666–671.
- [22] 高 伟, 周 丰, 郭怀成, 等. 滇池流域高分辨率氮、磷排放清单[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 240–250.
- GAO Wei, ZHOU Feng, GUO Huai-cheng, et al. High-resolution nitrogen and phosphorus emission inventories of Lake Dianchi watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(1): 240–250.
- [23] 董利民. 洱海流域水环境承载力计算与社会经济结构优化布局研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- DONG Li-min. Study on calculation of water environment carrying capacity and optimization of social economic structure in Erhai basin [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [24] 梁流涛, 冯淑怡, 曲福田. 农业面源污染形成机制: 理论与实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4): 74–80.
- LIANG Liu-tao, FENG Shu-yi, QU Fu-tian. Forming mechanism of agricultural non-point source pollution: A theoretical and empirical study[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4): 74–80.
- [25] 郭敬华, 王 刚, 李维鑫. 大理市在洱海周边建立四级污水收集处理系统[J]. 给水排水, 2010, 36(9): 165.
- GUO Jing-hua, WANG Gang, LI Wei-xin. Establishment of grade IV sewage collection and treatment system around Erhai Lake in Dali City[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2010, 36(9): 165.
- [26] 大理州提升城乡人居环境行动领导小组办公室. 关于开展洱海流域水环境治理抢救性工作的通知[EB/OL]. (2017-02-28)[2019-03-31]. <http://www.ynjst.gov.cn/detail.aspx?did=45002>.
- Office of the Leading Group for the Promotion of Urban and Rural Human Settlements in Dali Prefecture. Circular on carrying out emergency work of water environment management in Erhai River basin[EB/OL]. (2017-02-28)[2019-03-31]. <http://www.ynjst.gov.cn/detail.aspx?did=45002>.
- [27] 肖周燕, 沈左次. 人口集聚、产业集聚与环境污染的时空演化及关联性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 1–8.
- XIAO Zhou-yan, SHEN Zuo-ci. The temporal and spatial evolution of population & industrial agglomeration and environmental pollution and the relevance analysis[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(2): 1–8.
- [28] 孙海玲, 王红平. 基于岭回归的城市建筑能耗增长驱动因素研究[J]. 城市发展研究, 2013, 20(5): 21–24.
- SUN Hai-ling, WANG Hong-ping. The driving factors of the increase of the building energy consumption based on ridge regression[J]. *Urban Development Studies*, 2013, 20(5): 21–24.
- [29] Verhoef E T, Nijkamp P. Externalities in urban sustainability: Environmental versus localization-type agglomeration externalities in a general spatial equilibrium model of a single-sector monocentric industrial city[J]. *Ecological Economics*, 2002, 40(2): 157–179.
- [30] 席鹏辉, 梁若冰, 谢贞发. 税收分成调整、财政压力与工业污染[J]. 世界经济, 2017(10): 170–192.
- XI Peng-hui, LIANG Ruo-bing, XIE Zhen-fa. Tax sharing adjustments, fiscal pressure and industrial pollution[J]. *The Journal of World Economy*, 2017(10): 170–192.
- [31] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modelling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183(4): 323–349.
- [32] 蔡 明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 40–45.
- CAI Ming, LI Huai-en, ZHUANG Yong-tao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(7): 40–45.
- [33] 大理白族自治州统计局. 大理白族自治州统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- Dali Bai Autonomous Prefecture Bureau of Statistics. Statistical yearbook of Dali[M]. Beijing: China Statistical Press, 2017.
- [34] 大理白族自治州统计局. 大理白族自治州2016年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2017-02-13)[2019-03-31]. <http://www.dali.gov.cn/dlzwz/5117221712324198400/20170228/313565.html>
- Dali Bai Autonomous Prefecture Bureau of Statistics. Statistical commune on national economic and social development in Dali Bai Autonomous Prefecture in 2016[EB/OL]. (2017-02-13)[2019-03-31]. <http://www.dali.gov.cn/dlzwz/5117221712324198400/20170228/313565.html>
- [35] 环境部华南环境科学研究所. 生活源产排污系数及使用说明[EB/OL]. (2011-03-14)[2019-03-31]. http://www.scies.org/kycg/zykxym/201103/t20110314_604554.shtml
- South China Institute of Environmental Science. Sewage discharge co-

- efficient of source of life and its application description[EB/OL]. (2011-03-14)[2019-03-31]. http://www.scies.org/kycg/zykxym/201103/t20110314_604554.shtml
- [36] Ma G W, Wang S R. Temporal and spatial distribution changing characteristics of exogenous pollution load into Dianchi Lake, southwest of China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5):3781-3793.
- [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, SHEN Meng-nan, et al. Load evaluation of non-point source pollutants from reservoir based on export coefficient modeling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8):224-230.
- [38] 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5):1241-1249.
- ZHANG Tian, BU Mei-dong, GENG Wei. Pollution status and bio-gas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5):1241-1249.
- [39] 龚琦, 王雅鹏, 董利民. 基于云南洱海流域水污染控制的多目标农业产业结构优化研究[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4):475-478.
- GONG Qi, WANG Ya-peng, DONG Li-min. Multi-objective optimization of agricultural industrial structure based on water pollution control in Erhai basin in Yunnan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(4):475-478.
- [40] 陈海洋, 滕彦国, 王金生, 等. 晋江流域非点源氮磷负荷及污染源解析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5):213-219.
- CHEN Hai-yang, TENG Yan-guo, WANG Jin-sheng, et al. Pollution load and source apportionment of non-point source nitrogen and phosphorus in Jinjiang River watershed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(5):213-219.
- [41] 陈小华, 钱晓雍, 李小平, 等. 洱海富营养化时间演变特征(1988—2013年)及社会经济驱动分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1):70-78.
- CHEN Xiao-hua, QIAN Xiao-yong, LI Xiao-ping, et al. Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988—2013 and analyses of its socio-economic drivers[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(1):70-78.
- [42] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册[R]. 北京:国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室, 2008.
- Office of the Leading Group for the First National Survey of Pollution Sources Under the State Council. Discharge coefficient manual of the first national census of domestic source pollution[R]. Beijing: Office of the Leading Group for the First National Survey of Pollution Sources Under the State Council, 2008.
- [43] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册[R]. 北京:国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室, 2008.
- Office of the Leading Group for the First National Survey of Pollution Sources Under the State Council. Discharge coefficient manual of the first national census of industrial source pollution[R]. Beijing: Office of the Leading Group for the First National Survey of Pollution Sources Under the State Council, 2008.
- [44] 中华人民共和国农业农村部. 畜禽粪污土地承载力测算技术指南[R]. 北京:中华人民共和国农业农村部, 2018.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical guide for calculating the carrying capacity of livestock and poultry manure[R]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2018.
- [45] 潘红玺, 王云飞, 董云生. 洱海富营养化影响因素分析[J]. 湖泊科学, 1999, 11(2):184-188.
- PAN Hong-xi, WANG Yun-fei, DONG Yun-sheng. Factor analysis of eutrophication in Erhai Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1999, 11(2):184-188.
- [46] 大理州环境保护局. 洱海流域水环境保护治理“十三五”规划[R]. 大理:大理州环境保护局, 2016.
- Dali State Environmental Protection Bureau. 13th five-year plan for water environment protection and control in Erhai basin[R]. Dali:Dali State Environmental Protection Bureau, 2016.
- [47] 王金林, 武广云, 刘友林, 等. 云南省化肥施用现状及减量增效的途径研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(3):26-36.
- WANG Jin-lin, WU Guang-yun, LIU You-lin, et al. The fertilizer application status and the approach of fertilizer-reduce and efficiency-increase in Yunnan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(3):26-36.
- [48] 李江舟, 张庆忠, 娄翼来, 等. 施用生物炭对云南烟区典型土壤养分淋失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(1):48-53.
- LI Jiang-zhou, ZHANG Qing-zhong, LOU Yi-lai, et al. Effects of bio-char addition on nutrient leaching loss of typical tobacco-planting soils in Yunnan Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(1):48-53.
- [49] 白献宇, 胡小贞, 庞燕. 洱海流域低污染水类型、污染负荷及分布[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2):200-207.
- BAI Xian-yu, HU Xiao-zhen, PANG Yan. Pollution load, distribution and characteristics of low-polluted water in Lake Erhai watershed[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2):200-207.
- [50] 中国科学院生物学部. 我国化肥面临的突出问题及建议[J]. 科技导报, 1997(9):35-36.
- Chinese Academy of Sciences Department of Biology. Main problems of China's chemical fertilizer and their solutions[J]. *Science & Technology Review*, 1997(9):35-36.
- [51] 周应良, 杨艳飞, 杨静. 洱海流域畜禽养殖污染的调查和治理[J]. 中国畜牧业, 2017(18):71-72.
- ZHOU Ying-liang, YANG Yan-fei, YANG Jing. Investigation and control of livestock and poultry pollution in Erhai watershed[J]. *China Animal Industry*, 2017(18):71-72.
- [52] 胡婷. 洱海流域土地利用变化及驱动力分析[D]. 武汉:华中师范大学, 2012:59-61.
- HU Ting. Land-use change and driving forces analysis of Erhai Lake basin[D]. Wuhan:Central China Normal University, 2012:59-61.
- [53] 李锦胜. 洱海流域土地利用格局研究[J]. 环境科学导刊, 2011, 30(4):34-39.
- LI Jin-sheng. Research on structures and patterns of land use of Erhai watershed[J]. *Environmental Science Survey*, 2011, 30(4):34-39.