

DOI: 10.5846/stxb201904190794

高伟, 陈岩, 严长安, 李金城. 基于生态系统净化与人为调控耦合作用的水环境承载力评估. 生态学报, 2020, 40(14): 4803-4812.

Gao W, Chen Y, Yan C A, Li J C. Water environmental carrying capacity assessment based on ecosystem purification and human regulation coupling effect. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4803-4812.

基于生态系统净化与人为调控耦合作用的水环境承载力评估

高伟¹, 陈岩², 严长安³, 李金城^{4,*}

1 云南大学生态学与环境学院, 云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650091

2 生态环境部环境规划院, 北京 100012

3 昆明市环境科学研究院, 昆明 650032

4 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871

摘要: 针对目前水环境承载力相关研究中未突显生态系统净化作用和人为调控作用的问题, 从生态系统污染净化功能和人为调控污染削减功能两个角度, 提出基于生态系统净化-人为调控耦合作用的水环境承载力概念, 并构建流域环境承载力评估模型。以滇池流域为例, 计算了 2015 年滇池流域水环境承载力。研究结果表明: 滇池流域 2015 年水环境承载力综合指数为 1.16, 处于超载状态; 流域环境承载力分布呈现北高南低, 北部限制因子化学需氧量, 南部为总磷; 调水工程调入水量出境携带污染物约为流域水环境承载力的 16%, 对流域水环境改善十分重要; 人为调控污染削减能力在流域水环境承载力中所占比例已超过 50%, 成为不可忽视的一部分。

关键词: 流域环境承载力; 生态系统净化; 人为调控; 滇池流域

Water environmental carrying capacity assessment based on ecosystem purification and human regulation coupling effect

GAO Wei¹, CHEN Yan², YAN Changan³, LI Jincheng^{4,*}

1 School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University; Key Laboratory of Ecological and Environmental Restoration of Plateau and Mountain in Yunnan Province, Kunming 650091, China

2 Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China

3 Kunming Institute of Environmental Sciences, Kunming 650032, China

4 College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: In order to highlight the importance of the ecosystem purification and human regulation in the carrying capacity of water environment, the concept and evaluation model of water environment carrying capacity was built based on the ecosystem pollution purification and human-regulated pollution reduction. As a study case, water environmental carrying capacity of Dianchi Basin was calculated in 2015. The results illustrated that the environmental capacity comprehensive index of Dianchi Basin was 1.16, which was in an overload state. Regarding the distribution of environmental capacity, the north was higher than the south. The limiting factor of the north and south were Chemical Oxygen Demand and Total Phosphorus, respectively. The transfer of pollutants in the water transfer project was equivalent to 16% of the water environment carrying capacity, which was very important for the improvement of watershed environment. The reduction

基金项目: 国家自然科学基金(41701631); 云南省科技计划项目重点研发计划(2018BC002); 云南高原湖泊关键物种濒危机制及种群重建研究(2018FY001); 滇池流域水污染控制工程评估及精准治污决策系统研究

收稿日期: 2019-04-19; 网络出版日期: 2020-04-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lijincheng@pku.edu.cn

capacity of human regulation has taken up more than 50%, which has become a non-negligible part.

Key Words: watershed environmental carrying capacity; ecosystem purification; human regulation; Dianchi Basin

随着经济社会的发展,水资源短缺、水污染、水生态破坏等水环境问题日益突出,已成为制约人类社会可持续发展的瓶颈。我国最严格水管理制度的提出从水资源开发、用水效率和水功能区纳污三个角度设定管理目标,推动经济社会与水环境承载能力协调发展^[1-2]。水环境承载力(Water Environment Carrying Capacity, WECC)作为衡量区域经济社会与水环境协调发展程度,判定区域可持续发展状态的重要指标,对区域水资源管理、水环境优化、水生态恢复具有指导意义。

目前,水环境承载力评价尚未形成统一完整的评价体系,常用的评价方法有多目标规划模型、模糊综合评价模型、结构方程模型、压力-状态-响应模型等,由于研究出发的角度不同,其构建的评价指标体系也存在诸多差异。赵卫等人以水环境系统所能承载的最大经济规模为目标,采用多目标优化模型评价了辽河流域水环境承载力,运用情景分析法探讨水环境承载力优化途径,其在排污结构优化的过程中未将生态系统净化功能与人为调控污染削减功能区分^[3]。蓝希等人以水资源环境、水污染控制和社会经济承载3个子系统构建城市水环境承载力指标评价体系,采用熵权法和均方差决策法确定指标权重,评价武汉市城市水环境承载力,其所构建的评价指标体系的23个指标中包含了城镇污水处理等人为调控指标,但缺乏湿地等生态系统污染净化相关指标^[4]。崔丹等人以水环境承载力和水环境压力准则层确定水环境承载力综合评价指标,采用结构方程模型确定各指标权重,评估了湟水流域小峡桥断面以上的水环境承载力,其评估指标中包含水质净化能力相关指标,但缺乏人为调控污染削减相关指标^[5]。徐志清等人从社会经济、水资源和水生态3个子系统中选取18个指标构建水环境承载力评价指标体系并采用熵权法确定指标权重,利用模糊综合评价模型对南京市水环境承载力进行评价,其指标体系中涉及了污水处理率、绿化覆盖率等人为调控指标,缺乏生态净化相关指标^[6]。众多专家学者在水环境承载力计算过程中未能突显生态系统净化作用与人为调控作用在流域环境承载力中的重要性。截止2015年,我国共建设污水处理厂5343座,污水处理量达到507.78亿 m^3/a ,污水处理、再生水利用、湿地工程等环保设施不断完善,已成为改善流域水环境质量,提高水环境承载力最为重要的手段^[7-8]。第二次全国湿地调查结果显示,全国湿地总面积5360.26万 hm^2 ,湿地率为5.58%,人工湿地生态系统对污水有十分重要的净化作用,已成为改善我国地表水环境措施中重要的一环^[9-11]。如何在水环境承载力评估方法体系中凸显生态系统和人为调控双重作用显得十分关键。

针对当前水环境承载力评估方法体系中未突显生态净化作用与人为调控作用重要性的问题,本论文提出基于生态系统净化—人为调控耦合作用的流域水环境承载力评估模型,并以滇池流域为案例做简要分析,以期能为流域水环境承载力评价提供新的思路与方法。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

滇池流域(24°29'—25°28'N, 102°29'—103°01'E)地处长江、红河、珠江三大水系分水岭地带,地势北高南低,平均海拔1900 m,面积2920 km^2 。流域所处区域为亚热带湿润季风气候区,多年平均降水量978.8 mm(1951—2015年,昆明气象站)。流域全部位于昆明市境内,2015年常住人口为407.34万人,其中城镇369.68万人,城镇化率高达90.76%,流域国内生产总值达到3003.13亿元,占昆明市的75.65%。

2015年滇池流域土地利用中面积最大的是林地,为992.09 km^2 ,占总面积的34.43%,其次是建筑用地,耕地,草地和水域,分别占总面积的19.72%,18.66%,15.52%和11.67%。滇池多年平均水资源量 $5.30 \times 10^8 \text{ m}^3$,2015年人均水资源量仅244 m^3 ,远低于国际公认的人均500 m^3 的“极度缺水”标准^[4],因此,滇池流域水质受到了自然条件和经济社会的双重压力。

1.2 流域水环境承载力模型

从流域生态系统净化和人为调控两个角度出发,综合物质流分析和生态经济评估模,提出流域水环境承载力评估模型,公式如下:

$$WECC = ESV + HAV \tag{1}$$

式中,WECC 为流域环境承载力(t/a);ESV(Watershed Ecosystem Pollution Purification Capacity)为流域生态系统污染净化能力(t/a);HAV(Watershed Human Pollution Reduction Capacity)为流域人为调控污染削减能力(t/a)。

本研究采用水环境承载力综合指数作为评价流域是否超载的定量指标,公式如下:

$$WECSI = \text{Max} \left(\frac{\sum_i \text{WPD}_{ij}}{\text{WECC}_j} \right) \tag{2}$$

式中,WECSI(Comprehensive Index of Water Environment Carrying Capacity)为水环境承载力综合指数;WPD(Watershed Pollutant Discharge)为污染物排放量(t/a);WECC为水环境承载力(t/a);下标*i,j*分别为污染源类型和污染物类型。

1.3 流域生态系统污染净化能力评估方法

污染物在生态环境中降解是一个十分复杂的过程,本研究采用物料平衡法评估流域生态系统污染净化能力。物料平衡法又称物料衡算法,根据质量守恒定律产生,原理是在生产过程中,物质的输入和输出保持不变,其广泛应用于河流上下游监测断面间污染物变化,准确得到区域内污染物的排放和降解情况^[12]。物料平衡法在国外以成功应用于 Calumet Lake^[13]、Black River^[14]等流域,国内成功应用于三峡水库氮迁移转化^[15]、黄海近岸多环芳烃源解析^[16]等。物料平衡法原理如图 1 所示,流域污染物径流输出量与降解量之和等于流域污染物排放量与径流输入量之和^[17-18]。

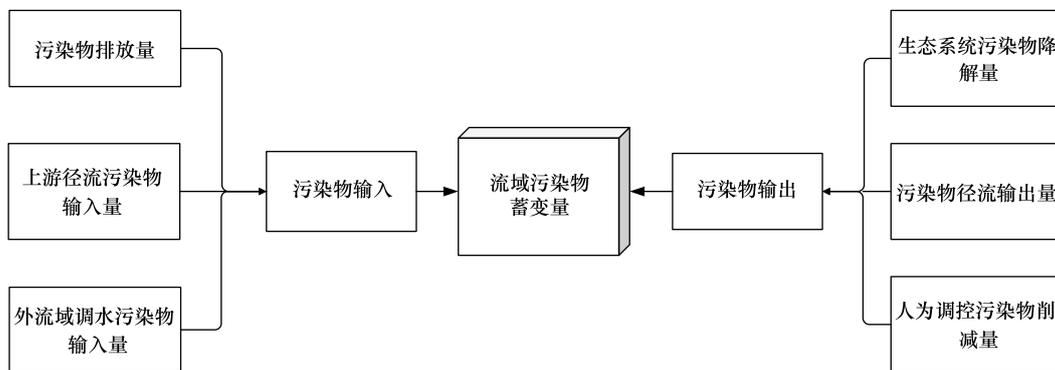


图 1 基于物料平衡法生态系统净化能力原理示意

Fig.1 Schematic diagram of ecosystem purification capacity based on material balance method

根据物料平衡原理,流域多年污染物蓄变量为零,即污染物输入与输出相等。因此,生态系统污染净化能力计算公式如下:

$$ESV_j = \sum_i \text{WPD}_{ij} + \text{UPI}_j + \text{WTI}_j - \text{HAV}_j - \text{OPA}_j \tag{3}$$

式中,ESV(Degradation of Pollutants in Ecosystems)为生态系统污染物降解量(t/a);WPD为污染物排放量(t/a);UPI(Pollutant Input of Upstream Runoff)为上游径流污染物输入量(t/a);WTI(Input Pollutant from Outer Watershed Water Transfer)为外流域调水污染物输入量(t/a);HAV为人为调控污染物削减量(t/a);OPA(Output Pollutant of Runoff)为污染物径流输出量(t/a)。

1.3.1 污染物排放量计算方法

污染物的排放量可分为点源和非点源,本研究中点源包括:城镇生活、工业、第三产业、规模化畜禽养殖,非点源包括:农村生活、散养畜禽、农业种植。其中,城镇生活、第三产业、农村生活污染物排放量计算参照《生活源产排污系数及使用说明》^[19],散养畜禽污染物排放量计算参照《中国有机肥料养分志》^[20],农业种植污染物排放采用标准农田修正法,参照《全国水环境容量核定技术指南》^[21],规模化畜禽养殖点源污染物排放量可从污染源普查数据中获得。

1.3.2 污染物输出量计算方法

本研究采用 The Load Estimator Model (LOADEST 模型) 估算河流出境断面的污染物通量。该模型基于实测污染物浓度、流量数据和监测日期三个变量,建立污染物浓度与其他两个变量的回归关系,以此为基础,计算出出境断面污染物通量^[22-24]。当水质监测数据信息不完整,出现缺失数据时,采用修正最大似然估算法消除这种误差;当模型残差符合正态分布时,使用最大似然法和修正最大似然法;当模型残差不符合正态分布时,采用最小绝对偏差法。

1.3.3 流域人为调控污染削减能力计算方法

本研究从减排角度,提出流域人为调控能力等于流域污染物削减能力,即流域内污染控制工程所发挥的污染物削减功能,计算公式如下:

$$HAV_j = HAVP_j + HAVNP_j \quad (4)$$

式中,HAV 为流域人类调控污染削减能力(t/a);HAVP 为点源污染物削减能力(t/a);HAVNP 为非点源污染物削减能力(t/a);下标 j 为污染物类型。

点源污染削减能力计算包括污水处理厂类削减量和非污水类排放源的削减量,计算公式如下:

$$HAVP_j = \sum_n [WT_n \times (IC_{jn} - OC_{jn}) \times 10^{-2}] + PT_j \quad (5)$$

式中,WT 为污水处理厂等点源污染削减工程的污水处理量(万 m^3/a);IC 和 OC 分别为污水处理设施的进口和出口污染物浓度(mg/L);PT 为规模化畜禽养殖厂的设施污染物削减量(t/a)。

畜禽养殖业的污染排放方式以固体(粪便)和液体(粪尿)为主,削减能力的计算方式也有所差别。本研究基于《畜禽养殖业污染治理工程技术规范(HJ497—2009)》和《畜禽养殖业污染物排放标准(GB 18596—2001)》中提供的处理方式和参数提出规模化畜禽养殖的污染削减计算公式,公式如下:

$$PT_j = \sum_r [LVS_r \times (LSR_{rj} + LLR_{rj}) \times 10^{-3}] - \sum_r [LVSS_r \times 365 \times LPW_{rj} \times LWC_j \times 10^{-9}] \quad (6)$$

式中,LVS 为畜禽养殖规模(头或只或羽);LSR 和 LLR 分别为粪便和尿液中的污染物排放系数($kg \text{ 只}^{-1} \text{ a}^{-1}$);LVSS 为畜禽存栏规模;LPW 为污水排放系数($L \text{ 只}^{-1} \text{ d}^{-1}$);LWC 为畜禽养殖场排放污水中的污染物浓度(mg/L); r 为畜禽类型。

非点源主要包括散养畜禽、农村生活、农业种植等。非点源污染削减计算相对困难,本研究主要计算可量化评估的工程措施。非点源工程措施分为污水处理设施类、湿地工程类和其他类 3 个部分,计算公式如下:

$$HAVNP_j = NPWW_j + NPWT_j + NPOT_j \quad (7)$$

式中,NPWW 为污水处理类工程的污染物削减量(t/a);NPWT 为湿地类工程的污染物削减量(t/a);NPOT 为其他工程的污染物削减量(t/a)。

污水处理设施类工程是指农村生活污水处理设备,其计算方法与城镇污水处理厂类似,计算公式如下:

$$NPWW_j = \sum_n [RWT_n \times (RIC_{jn} - ROC_{jn}) \times 10^{-2}] \quad (8)$$

式中,RWT 为农村生活污水处理厂等非点源污染削减工程的污水处理量(万 m^3/a);RIC 和 ROC 分别为污水处理设施的进口和出口年均污染物浓度(mg/L)。

湿地类工程是指河口或湖岸的湿地,其削减量的计算方法与污水处理设施计算方法相同。

其他污染源是指散养畜禽。散养畜禽的污染处理尚无相关规范和标准,农村地区也难以建设集中式污染

处理设备,本研究主要考虑散养畜禽粪便的综合利用,如沼气和堆肥。

$$NPOT_j = \sum_r [LVS_r \times (LSR_{rj} + LLR_{rj}) \times 10^{-3}] \times [1 - \sum_k MT_k / \sum_r (LVS_r \times LSE_r \times RT_r \times 10^{-3})] \quad (9)$$

式中, LVS 为畜禽养殖规模(头或只或羽); LSR 和 LLR 分别为粪便和尿液中的污染物排放系数($\text{kg 只}^{-1} \text{a}^{-1}$); MT 为粪便处理量(t/a); LSE 为畜禽粪污系数($\text{kg 只}^{-1} \text{a}^{-1}$); RT 为畜禽养殖周期(d); k 为研究区的畜禽粪便处理设施编号。

2 案例研究

2.1 滇池流域生态系统污染净化能力评估

2.1.1 污染物排放量

根据上文中污染物排放量计算方法,对滇池流域的主要污染源排放量进行计算,具体结果如表 1 所示。滇池流域的化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)、氨氮(Ammoniac Nitrogen, $\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷(Total Phosphorus, TP)排放量分别达到 120740、14228、2342 t/a 。污染物排放以点源排放为主,COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 排放量分别占总排放量的 95%、94%、82%,而点源排放中以城镇生活排放为主,分别占总排放量的 80.46%、90.18%、77.07%。表 1 中未对滇池流域规模化畜禽养殖污染物排放进行统计,原因是昆明市颁布《在“一湖两江”流域禁止畜禽养殖的规定》^[25],自 2008 年 6 月 30 日起,禁止任何单位和个人在滇池流域 2920 km^2 范围内进行大规模畜禽养殖。

表 1 滇池流域主要污染源污染物排放量/ (t/a)

Table 1 Discharge of major pollutant sources in Dianchi basin

污染源 Pollution source	化学需氧量(COD) Chemical oxygen demand	氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$) Ammoniac nitrogen	总磷(TP) Total phosphorus
工业 Industry	1605	101	30
城镇生活 Urban household	97144	12831	1805
第三产业 Tertiary industry	16192	406	111
农村生活 Rural household	1949	77	51
农业种植 Agriculture	0	647	255
散养畜禽 Free-range livestock	3850	166	119
合计 Total	120740	14228	2342

2.1.2 流域出境污染物量

滇池流域出口有 2 个,海口河与西园隧洞,基于 2000—2015 年逐日流量和逐月水质监测数据,采用 LOADEST 模型,估算出流域出境逐日输出负荷,并统计多年平均污染物输出负荷量,最后将 2 个出口的负荷进行加和处理,作为流域出境污染物通量值。经计算,滇池流域 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 出境污染物多年平均值分别为 17693.43、899.42、401.63 t/a 。其中海口河 COD 逐日输出负荷多年平均值为 9137.06 kg/d ,变化范围为 501—68503 kg/d , $\text{NH}_3\text{-N}$ 逐日输出负荷的多年平均值为 574.03 kg/d ,变化范围为 14—1451 kg/d ,TP 逐日输出负荷的多年平均值为 141.91 kg/d ,变化范围为 10—1753 kg/d 。具体结果如图 2 所示,海口河逐日污染物负荷量年际和年内波动较大,主要与径流量有关,其中 2010—2013 年滇池流域出现较严重的干旱,导致该时期的污染物输出量较低。

西园站 COD 逐日输出负荷多年平均值为 8556.49 kg/d ,变化范围为 0—47049 kg/d , $\text{NH}_3\text{-N}$ 逐日输出负荷的多年平均值为 325.39 kg/d ,变化范围为 0—749 kg/d ,TP 逐日输出负荷的多年平均值为 259.72 kg/d ,变化范围为 0—862 kg/d 。具体结果如图 2 所示,西园隧洞逐日污染物负荷变化规律与海口河相似,年际和年内变化较大,与海口河不同的是西园隧洞出流量与负荷在干旱期间未出现显著下,主要原因是该区域污水来自于城镇生活。

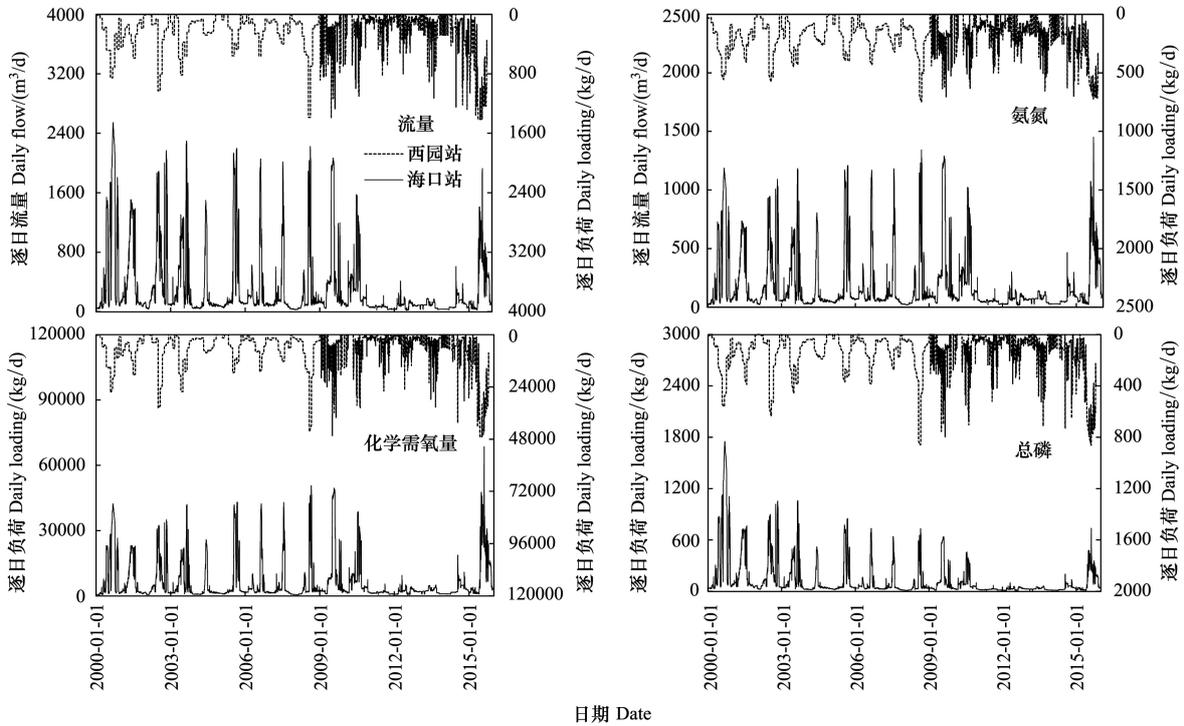


图2 海口站、西园站逐日流量及负荷

Fig.2 Daily load of flow and pollutants in Haikou and Xiyuan station

2.1.3 外流域调水污染物输入量

滇池流域于2007年启动掌鸠河供水工程,年均调水量1.75亿 m³,2012年启动清水海供水工程,年均调水量0.68亿 m³。2013年启动牛栏江调水工程,2015年向滇池流域补水5.27亿 m³,滇池2011—2015年调水量如图3中所示,2014年后牛栏江调水工程已超过总调水量的50%。滇池流域2011—2015年调水水质如图3中所示,调水水质年际变化大,COD、NH₃-N含量整体呈下降趋势。外流域调水的一方面缓解了流域内水资源短缺和水污染问题,另一方面也带来污染负荷。经计算,滇池流域2015年COD、NH₃-N、TP污染物输入负荷分别为1039.76、524.29、167.33 t/a。

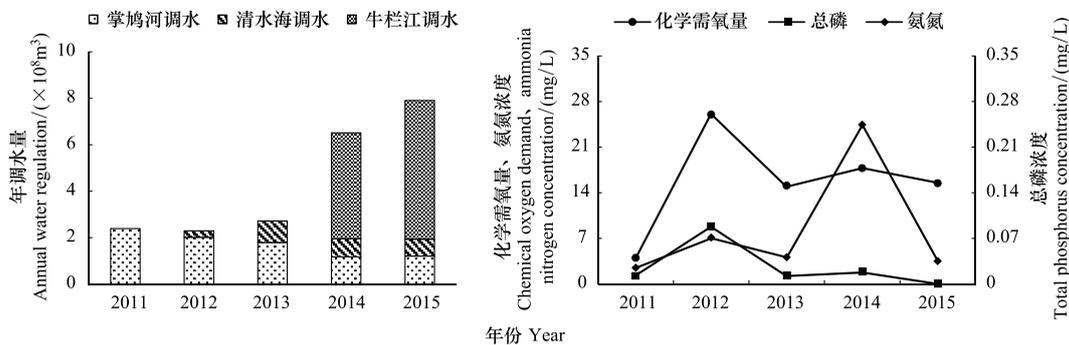


图3 滇池流域2011—2015年调水量及水质

Fig.3 Water diversion and quality of Dianchi basin from 2011 to 2015

根据1.3节公式(3),计算得到滇池流域2015年COD、NH₃-N、TP三种污染物生态系统净化能力分别为17935.21、6187.58、700.37 t/a。

2.2 滇池流域人为调控污染削减能力评估

2015 年底,滇池流域已建成 23 座污水处理厂,污水处理能力达到 199 万 m^3/d 。未纳入主城区污水处理厂的集镇建设污水处理站 10 个,处理能力为 1.23 万 m^3/d ,开发区、工业园区建成 5 个园区污水处理厂,处理能力为 9.5 万 m^3/d 。全流域已建成 885 个村庄生活污水收集处理设施,484 座再生水利用实施。根据流域人为调控能力计算方法,计算得到 2015 年滇池流域的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 的削减量分别为 86151、7665、1407 t/a。各子流域污染物削减能力分布如图 4 所示,整体呈现北高南低,其中 COD 削减能力大于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 大于 TP,因昆明市主城区分布在滇池北岸,污水处理设施完善,污染物削减量高。南部地区为昆明市农田耕种区,污水收集处理率低,污染物削减量少。

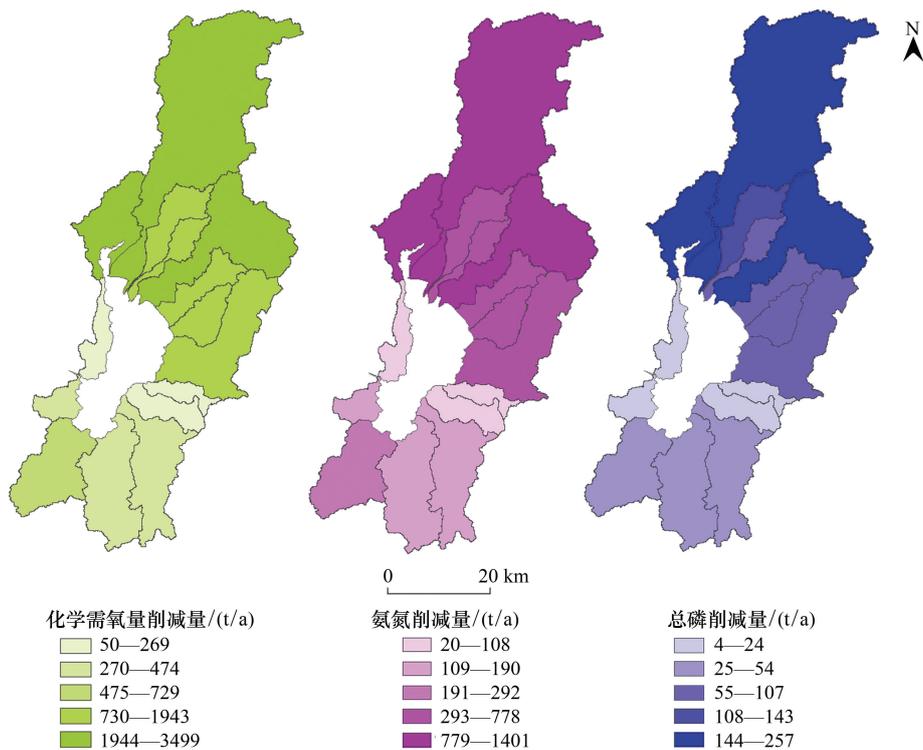


图 4 滇池流域子流域污染物削减量

Fig.4 The pollutant reduction of Dianchi sub-basin

2.3 滇池流域水环境承载力评估

根据水环境承载力计算模型,滇池流域环境承载力由滇池流域生态系统污染净化能力和滇池流域人为调控污染削减能力。滇池流域 2015 年 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 环境承载力分别为 104086.21、13852.58、2107.37t/a,其中生态系统污染净化能力分别为 17935.21、6187.58、700.37t/a,人为调控削减能力分别为 86151、7665、1407 t/a,分别占总承载力的 82.77%、55.33%、66.77%,人为调控污染削减能力已经超过生态系统污染削减能力,成为流域环境管理重要的手段。滇池流域各子流域环境承载力如图 5 所示,3 种污染物承载能力分布上均呈北高南低,与人为调控污染削减能力分布类似。北部地区以森林、草地为主,产流能力高,南部耕地面积多,产流能力低,相应的生态系统污染净化能力北部比南部高。

滇池流域 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 水环境承载指数分别为 1.16、1.09 和 1.11,均大于 1,处于超载状态。根据流域水环境承载力综合指数为所有指标中的最大值,滇池流域 2015 年水环境承载力综合指数为 1.16,超载 16%。

滇池流域 15 个主要入湖河流子流域中有 6 个子流域水环境承载力综合指数大于 1,占流域陆域面积的

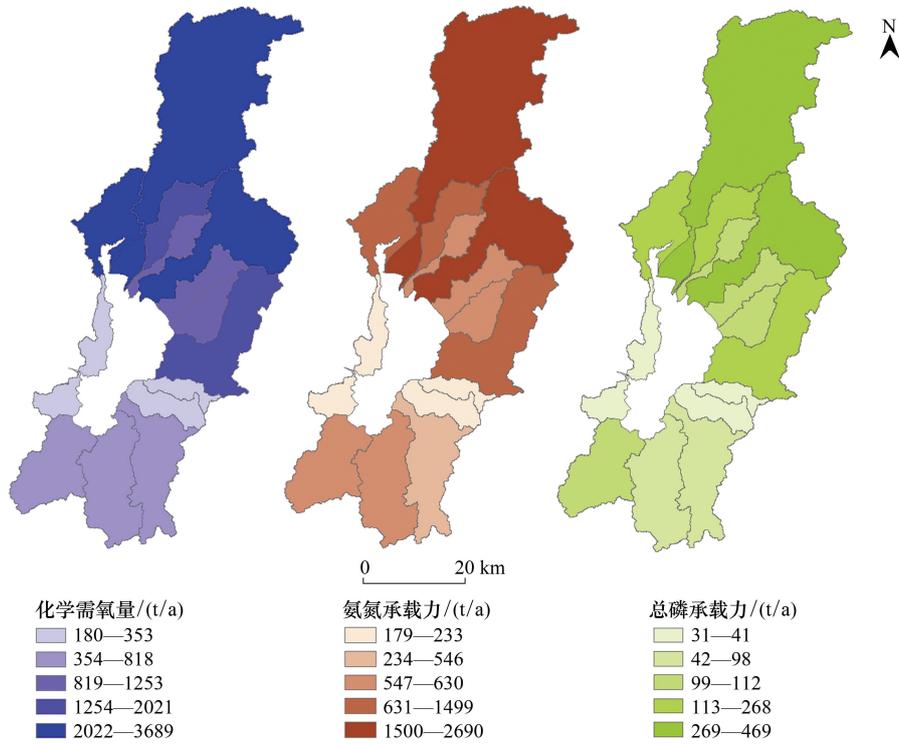


图5 滇池流域子流域环境承载力

Fig.5 The environmental carrying capacity of Dianchi sub-basins

54%,具体分布如图6所示,其中最大值是草海子流域,为1.98,最小值是海河子流域,为0.22,水环境承载力综合指数空间分布上呈现北部高,中部低的特征,这与区域经济发展模式和污染源分布有关。从污染物排放格局中发现,排放强度以城区为中心呈放射状分布。各子流域水环境承载力制约因子分布如图6所示,整体上COD制约因子的流域面积多于TP,其中北部子流域以COD制约因子为主,南部子流域以TP制约因子为主,主要原因是为北部为昆明市主城区,城镇生活污染压力大,南部为昆明市耕地集中区,农业面源污染严重,且南部为富磷区,因此TP为制约因子。

本研究构建的流域水环境承载力模型计算得到的水环境承载力会高于目前常用模型,如石建屏等人从水资源承载力和水质承载力两个角度采用层次分析法和指标体系法评估了滇池流域2003—2010年水环境承载力,其计算的水环境承载力低于本研究^[26]。邓伟明等人以水资源和水环境承载力作为广义水环境承载力,采用水环境承载率评估滇池流域2008年水环境承载状态,其计算的水环境承载力低于本研究^[27]。造成差异的主要原因是本研究水环境承载力中包含人为调控污染削减能力,而目前常用的水环境承载力评估模型在计算污染物排放量时将削减量直接扣除,即压力中包含了污染削减能力,导致水环境承载力计算结果低于本研究。2015年滇池流域开展牛栏江调水工程以改善滇池水污染现状,调水水质COD、NH₃-N、TP含量年平均值明显低于滇池出流水质,调入清洁水资源增大了滇池流域水环境承载力。根据调水水量水质与流域出流量水质,计算得到调水出境携带COD、NH₃-N、TP分别为16654、375、235t,相当于水环境承载力的16.00%、2.71%、11.13%,调水工程对滇池流域污染状况的改善具有一定的推动作用。

3 结论

本研究以水环境质量改善为核心,从生态系统净化作用和人为调控削减作用两个角度出发,提出了基于生态系统净化-人为调控耦合作用的水环境承载力评估模型,重点突出人为调控作用在流域水环境承载力评估中的重要性,并对滇池流域水环境承载力进行了评估,主要结论如下:

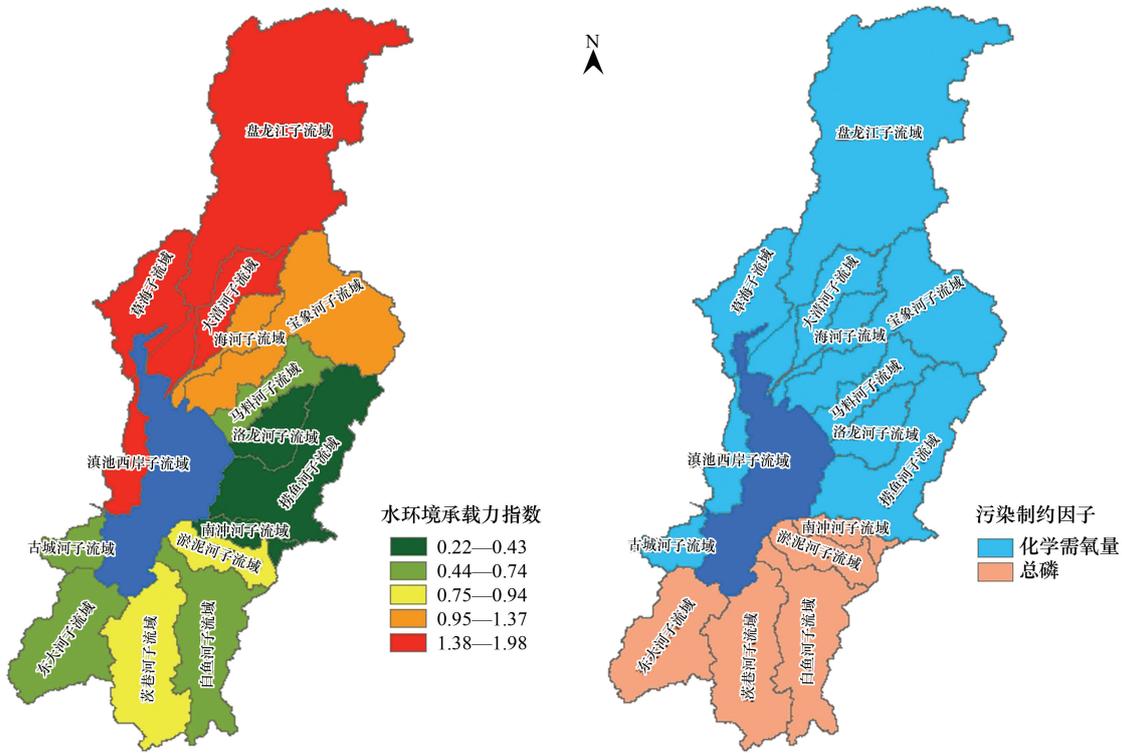


图 6 滇池流域子流域水环境承载力综合指数与制约因子

Fig.6 Water environment carrying capacity index and constraint factors in sub-basins of Dianchi basin

(1) 滇池流域 2015 年水环境承载状态为超载,3 项污染指标的水环境承载力综合指数中 COD 最大。滇池流域超载的入湖河流子流域面积超过总面积的 50%,空间分布上呈现北高中低。流域北部制约因子以 COD 为主,南部以 TP 为主。

(2) 滇池流域 2015 年水环境承载力评估中,人为调控作用下 3 类污染物削减量已超过水环境承载力的 50%,COD 削减量所占比例高达 83%,人为调控作用对流域水环境质量改善至关重要,已成为流域水环境承载力评估过程中不可忽视的组成部分。

(3) 由于缺乏调水、湿地工程水质等日监测数据,可能导致滇池流域水环境承载力评估结果偏小,今后可增补详实的水质监测数据和可靠的非点源削减社会调研数据增加滇池流域环境承载力评估结果的准确性。

参考文献 (References):

[1] 左其亭,胡德胜,窦明,等. 基于人水和谐理念的最严格水资源管理制度研究框架及核心体系. 资源科学. 2014, 36(5): 906-912.

[2] 冯浩源,石培基,周文霞,等. 水资源管理“三条红线”约束下的城镇化水平阈值分析——以张掖市为例. 自然资源学报. 2018, 33(2): 287-301.

[3] 赵卫,刘景双,苏伟,等. 辽宁省辽河流域水环境承载力的多目标规划研究. 中国环境科学. 2008,28(1): 73-77.

[4] 蓝希,刘小琼,郭炎,陈昆仑.“长江经济带”战略背景下武汉城市水环境承载力综合评价. 长江流域资源与环境, 2018, 27(07): 1433-1443.

[5] 崔丹,李瑞,陈岩,马冰然,贾紫牧,曾维华. 基于结构方程的流域水环境承载力评价——以湟水流域小峡桥断面上游为例. 环境科学学报, 2019, 39(02): 624-632.

[6] 徐志青,刘雪瑜,袁鹏,张茉莉,肖书虎,廖纯刚. 南京市水环境承载力动态变化研究. 环境科学研究, 2019, 32(4): 557—564.

[7] 李喆,赵乐军,朱慧芳,等. 我国城镇污水处理厂建设运行概况及存在问题分析. 给水排水. 2018, 54(4): 52-57.

[8] 宋连朋,魏连雨,赵乐军,等. 我国城镇污水处理厂建设运行现状及存在问题分析. 给水排水. 2013, 49(3): 39-44.

[9] 耿国彪. 我国湿地保护形势不容乐观-第二次全国湿地资源调查结果公布. 绿色中国, 2014(3): 8-11.

- [10] 许明, 储时雨, 蒋永伟, 涂勇, 刘伟京, 肖椿. 太湖流域化工园区污水处理厂尾水人工湿地深度处理实验研究. 水处理技术, 2014, 40(5): 87-91.
- [11] 杨宗慧, 李亚园, 马贵鹏, 赵琦琳. 人工湿地工艺在污水处理中的应用优势分析. 西南农业学报, 2017, 30(7): 1652-1655.
- [12] 于婕, 李怀恩. 西安市对渭河水质的影响分析. 环境科学. 2013, 34(5): 1700-1706.
- [13] An L, Jae-Kil J, Scheff P A. Application of EPA CMB8.2 model for source apportionment of sediment PAHs in Lake Calumet, Chicago. Environmental Science and Technology, 2003, 37(13): 2958-2965.
- [14] Sheng-He G, Kralovec A C, Christensen E R, Camp R P V. Source apportionment of PAHs in dated sediments from the Black River, Ohio. Water Research, 2003, 37(9): 2149-2161.
- [15] Ran X, Bouwman L, Yu Z, Beusen A, Chen H, Yao Q. Nitrogen transport, transformation, and retention in the Three Gorges Reservoir: A mass balance approach: Nitrogen in the Three Gorges Reservoir. Limnology & Oceanography, 2017, 62.
- [16] 薛荔栋, 郎印海, 刘爱霞, 刘洁. 黄海近岸表层沉积物中多环芳烃来源解析. 生态环境学报, 2008, 17(4): 1369-1375.
- [17] Xu M, Han H, Kang S. Modeling Glacier Mass Balance and Runoff in the Koxkar River Basin on the South Slope of the Tianshan Mountains, China, from 1959 to 2009. Water. 2017, 9(1002).
- [18] Sekhar C, Umamahesh N V. Mass balance approach for assessment of pollution load in the Krishna River. Journal of environmental science & engineering. 2004, 46(2): 159-171.
- [19] 张玉华, 刘东生, 徐哲, 等. 重点流域农村生活源产排污系数监测方法研究与实践. 农业环境科学学报. 2010, 29(4): 785-789.
- [20] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [21] 董飞, 刘晓波, 彭文启, 等. 地表水水环境容量计算方法回顾与展望. 水科学进展. 2014, 25(3): 451-463.
- [22] 张柏发, 陈丁江. 1980-2010 年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应. 环境科学. 2014, 35(8): 2911-2919.
- [23] 李娜, 盛虎, 何成杰, 等. 基于统计模型 LOADEST 的宝象河污染物通量估算. 应用基础与工程科学学报. 2012, 20(3): 355-366.
- [24] Chen L, Sun C, Wang G, et al. Event-based nonpoint source pollution prediction in a scarce data catchment. Journal of Hydrology. 2017, 552: 13-27.
- [25] 《在“一湖两江”流域禁止畜禽养殖的规定》. <http://www.km.gov.cn/c/2017-03-30/1746350.shtml>
- [26] 石建屏, 李新. 滇池流域水环境承载力及其动态变化特征研究. 环境科学学报. 2012, 32(7): 1777-1784.
- [27] 邓伟明, 雷坤, 苏会东, 等. 2008 年滇池流域水环境承载力评估. 环境科学研究. 2012, 25(4): 372-376.