

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0451

高伟, 伊璇, 刘永, 等. 2016. 可持续性约束下开放流域系统氮磷环境承载力研究[J]. 环境科学学报, 36(2): 690-699

Gao W, Yi X, Liu Y, et al. 2016. Environmental carrying capacity of nitrogen and phosphorus in an open watershed system under sustainability requirement[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(2): 690-699

## 可持续性约束下开放流域系统氮磷环境承载力研究

高伟, 伊璇, 刘永, 郭怀成\*

北京大学环境科学与工程学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871

收稿日期: 2015-04-07 修回日期: 2015-05-04 录用日期: 2015-05-04

**摘要:** 随着我国有机污染物控制力度不断加大, 氮磷营养盐逐步凸显为流域环境质量改善与经济社会发展的重要约束因子. 如何以流域氮磷环境承载力为约束, 实现经济社会优化发展已成为我国流域环境管理面临的主要难题. 传统的环境承载力研究局限于流域内部的自然资源约束和经济社会优化, 忽略了流域内外物质交换对承载力的影响, 结果往往以牺牲外部可持续性为代价. 基于开放系统视角, 本研究提出可持续性约束下的流域氮磷环境承载力概念与测度方法, 认为流域氮磷环境承载力是指在流域内外氮磷营养盐交换平衡的前提下, 流域水环境氮磷含量达标情况下所能承载的最大人口规模. 以氮磷污染严重的滇池流域为例, 构建了氮磷环境承载力优化模型, 得到滇池湖体氮磷达标和流域内外氮磷交换平衡约束下流域的最大人口承载能力为 538 万人, 相对于现状 2010 年可提升 32%; 此外, 外流域调水、氮磷循环利用率和污水外排等措施对承载力有显著影响.

**关键词:** 营养盐; 环境承载力; 可持续发展; 污染转移; 滇池流域; 氮; 磷

文章编号: 0253-2468(2016)02-690-10 中图分类号: X32 文献标识码: A

## Environmental carrying capacity of nitrogen and phosphorus in an open watershed system under sustainability requirement

GAO Wei, YI Xuan, LIU Yong, GUO Huaicheng\*

Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871

Received 7 April 2015; received in revised form 4 May 2015; accepted 4 May 2015

**Abstract:** As mitigation of organic pollution has become an increasing priority in China, the importance of nutrients such as nitrogen and phosphorus as controls for improving environmental quality and socioeconomic development has become more evident. A key question for environmental management in Chinese watersheds is how to sustain socioeconomic activity in compliance with environmental quality. Conventional environmental carrying capacity studies focus on the internal relationship between environment and human actions in watersheds and overlooks the interactions between activities inside and outside the watershed, resulting in decisions which may compromise the sustainability of external regions. We develop a concept and corresponding model of environmental carrying capacity from an open system perspective, in which the maximum sustainable population is determined that meets environmental standards for aquatic nutrient concentrations (nitrogen and phosphorus) and balances the exchange of nutrients across watershed boundaries. Using Lake Dianchi Basin, which suffers from severe nutrient pollution, as a case study, an optimization model of carrying capacity is established. Results show that the maximum sustainable population of the basin can reach 5.38 million, which is 32% higher than that of 2010. Water transfer, nutrient recycling rate and pollution transfer are important factors influencing the carrying capacity of the basin.

**Keywords:** nutrients; environmental carrying capacity; sustainability; pollution transfer; Lake Dianchi; nitrogen; phosphorus

### 1 引言 (Introduction)

承载力研究起源于生态学, 最初用于计算草场

的最大载畜量 (高鹭和张宏业, 2007). 随着可持续发展研究的兴起, 承载力与环境学紧密结合, 形成了多种环境学相关概念, 成为研究人类活动与环境

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No.2013ZX07102-006); 国家自然科学基金 (No.41222002)

Supported by the National Science & Technology Major Projects for Water Pollution Control (No.2013ZX07102-006) and the National Natural Science Foundation of China (No.41222002)

作者简介: 高伟 (1986—), 男, 博士研究生, E-mail: gaoweird@163.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: guohc@pku.edu.cn

Biography: GAO Wei (1986—), male, Ph.D. candidate, E-mail: gaoweird@163.com; \* Corresponding author, E-mail: guohc@pku.edu.cn

关系的重要概念. 在环境学领域, 与承载力相关的概念有生态承载力(安宝晟和程国栋, 2014)、土地承载力(杨亮等, 2010)、水资源承载力(段春青等, 2010)、水环境承载力(石建屏和李新, 2012)、水生生态承载力(王西琴等, 2011)、大气环境承载力(徐大海和王郁, 2013)和旅游承载力(汪宇明和赵中华, 2007)等, 这些概念从环境综合或环境要素的角度界定了人类活动与各种资源与环境的关系, 建立了环境与人类活动之间的响应关系(王俭等, 2005). 从一般意义上, 环境承载力是指某一时刻环境系统所能承受的人类社会、经济活动的的能力阈值(郭怀成等, 2001), 包含承载主体和客体两个基本要素. 然而, 环境承载力是一个相对开放的概念, 目前尚无公认的统一界定. 在各种环境承载力研究案例中, 对承载主体和客体界定的不同在很大程度上决定了环境承载力的研究内容和方法. 在承载客体上, 不同概念之间的区别主要在于承载客体表征指标上, 目前主要分为经济社会规模(王西琴等, 2014)和综合指数(王奎峰等, 2014)两大类, 前者往往以人口数量和地区生产总值为承载力表征指标, 后者以经济、社会与环境综合指数为指标. 从承载主体上, 目前环境承载力研究多是针对自然资源(如水、土、气资源)和常规污染物(化学需氧量、氨氮、SO<sub>2</sub>环境容量)环境容量开展的, 以氮磷营养盐环境容量为承载主体的研究相对较少. 相对于传统资源和环境污染物, 区域氮磷营养盐变化与粮食生产和消费密切相关, 而区域粮食的输入与输出被认为影响氮磷变化的重要驱动力(Lassaletta *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2015), 特别是在人口集中的城市地区. 然而, 目前的环境承载力研究往往集中于区域内部, 以某个区域的资源环境和人类活动为研究对象, 忽略了区域内外资源、环境和经济社会的交互作用, 无法反映现实中存在频繁物质交换的开放系统特点. 因此, 有必要从开放系统的角度提出一个能够体现流域内外交互作用的环境承载力概念与方法. 流域作为一个开放系统, 与外界存在密切的资源与环境交流, 其自身可持续性与其对外界的资源依赖性有密切联系(郭怀成等, 2012). 针对当前流域环境承载力研究的不足, 本研究基于流域环境承载力的基本理论与方法, 提出了开放系统视角下的流域氮磷环境承载力的概念与测度方法, 并以滇池流域为例, 研究了流域内外氮磷交互作用下的氮磷环境承载力.

## 2 可持续性约束下开放流域氮磷环境承载力的概念与方法(Concepts and methods of environmental carrying capacity of nitrogen and phosphorus in an open watershed under sustainability)

### 2.1 概念界定

在一个封闭流域系统中, 流域内的人口食品消费完全来自于本地的种植业和畜牧业生产, 没有食品和饲料的输入或输出(图1). 此时, 流域中的氮磷输入主要是由流域内的人类活动控制, 流域可承载的人口数量取决于流域本地的水量与水质, 不需要考虑流域内外的营养盐交换问题. 因此, 封闭系统的流域氮磷承载力可以被定义为当流域水环境中氮磷含量达标的情况下, 流域所能支撑的人口规模. 然而, 现实中的流域多为开放系统, 与外界存在频繁的物质、能量和信息交流, 其内部的状态受到外部环境的影响和控制(郭怀成等, 2012). 在开放的流域系统中, 压力和承载能力可随流域内外能量、信息和物质交换发生流动, 导致流域氮磷营养承载力由流域内外共同决定(图2). 因此, 一个开放流域系统的氮磷承载力不仅取决于其内部的资源承载力和压力状况, 流域内外的交互作用对其也有重要影响. 对氮磷而言, 通过食品进出口带来的营养盐交换问题是导致流域内营养盐输入变化的重要驱动力(Lassaletta *et al.*, 2014). 故对于开放流域氮磷环境承载力的界定, 必须考虑流域内外的营养盐交换问题.

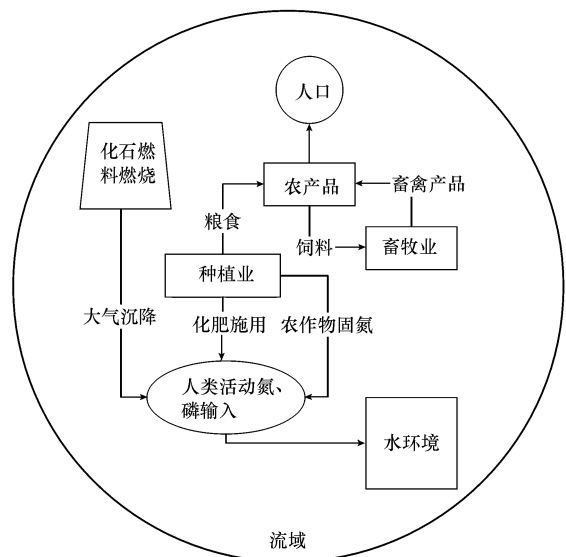


图1 封闭流域氮磷环境承载力系统

Fig.1 Watershed carrying capacity of N and P in a closed environmental system

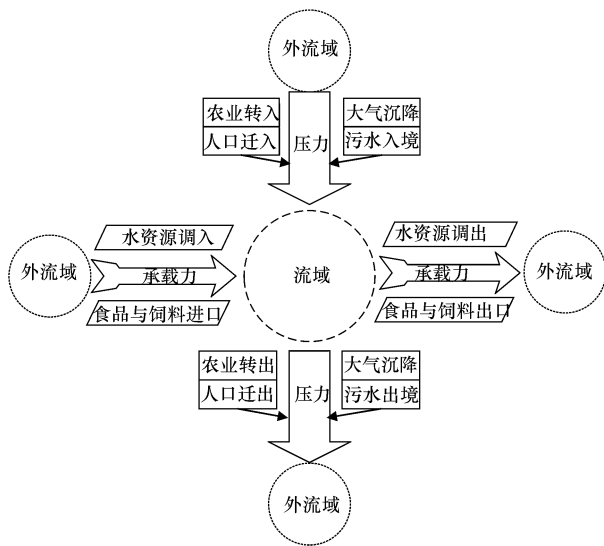


图2 开放流域氮磷环境承载力系统

Fig.2 Watershed carrying capacity of N and P in an open environmental system

综上,本研究认为流域氮磷营养盐承载力是指在流域内外氮磷营养盐交换平衡的前提下,流域水环境氮磷含量达标情况下所能承载的最大人口规模.该定义以流域水环境作为承载主体,以流域内人口作为承载客体,承载条件是本地的水环境中氮磷营养盐含量不超标,且流域内外营养盐交换平衡,即不发生污染转移问题.

## 2.2 承载力测度模型

目前常用的环境承载力测度模型可以概括为指标体系综合评价法、生态足迹法、系统动力学方法、优化方法等4类.其中,指标体系综合评价法是通过将反映经济、社会、环境质量的多种指标进行综合成一个指数或综合指标来评价区域的承载能力.常用的指标体系综合评价法有P-S-R(压力-状态-响应)(王奎峰等,2014)、矢量模法(李磊等,2014)、模糊综合评价法(段新光和栾芳芳,2014)、主成分分析法(王春娟等,2012)和模糊物元模型(张会涓等,2012)等.指标体系综合评价法主要优点是计算结果的综合性强,计算过程相对简单;但该方法的结果通常为单一指数,相对抽象,难以对具体管理实践形成有效指导.生态足迹法是承载力量化的另一经典方法,它是一种从资源的供需角度研究承载力问题的模型,该方法通过数学转换方法将区域的自然资源和人类活动强度折合为标准的生产性土地面积,通过比较两者之间的差异判断承载力状况(Wackernagel and Yount, 1998; 刘东等,

2012).从经典生态足迹法延伸出水资源足迹(陈颢等,2011)、污染足迹(焦雯珺等,2011)和碳足迹(肖玲等,2013)等多种概念与模型.生态足迹的主要特点是方法相对成熟和稳健,结果直观且易于理解,但缺点是涉及大量生产力转换参数,在不同区域应用时,面临本土化参数缺少问题和不同生产性土地功能替代性的假设问题.系统动力学在处理复杂、非线性和反馈问题上具有一定的优势,近年来在环境承载力领域得到广泛应用(王西琴等,2014; 徐琳瑜和康鹏,2013),但该模型的优化功能相对较弱.优化模型是环境承载力研究中的另一重要模型,能够处理非线性、动态、不确定性、多目标等多种复杂问题,在环境承载力研究中得到广泛应用(朱一中等,2005; 曾维华和杨月梅,2008).相对于其它模型,优化模型的计算结果与管理实践联系紧密且模型功能较为稳健.此外,为综合不同模型的特点,在环境承载力测度研究中也出现了大量耦合模型研究与应用,如系统动力学与指标体系评价法的耦合(徐琳瑜和康鹏,2013),系统动力学与生态足迹模型的耦合(韦静和曾维华,2009)以及系统动力学与优化模型的耦合(王西琴等,2014).

环境承载力量化模型的选择与概念的界定和研究目的有密切联系,不同的承载力研究在侧重点上不同,量化方法也应有所区别.例如,当环境承载力被定义为一种综合的人类活动强度,综合评价法可能较为适用.在本研究中,流域氮磷承载力的概念强调一定约束条件下流域水环境所能支撑的最大人口规模,概念中体现了优化与约束的要求,可采用优化模型进行量化.

根据本研究的概念界定,流域氮磷环境承载力是在流域内外营养盐交换平衡和水环境营养盐浓度达标的约束条件下,流域可承载的最大人口数量,在概念上体现了优化的要求.因此,本研究基于氮磷环境承载力概念的基本要素,构建了承载力优化模型.模型的优化目标是人口数量的最大化,决策变量为流域粮食生产规模和畜禽养殖量,具体模型方程如下:

(1) 优化目标: 人口数量最大化

$$\text{Max POP} \quad (1a)$$

(2) 约束条件:

食品与饲料的氮磷输入不能超过人口迁入带来的氮输入,保证流域内外氮磷交换平衡,避免发生氮磷转移污染问题

$$\text{NFFNI} \leq (\text{POP} - \text{BPOP} \times A) \times \text{ANANI} \quad (1b)$$

$$\text{NFFPI} \leq (\text{POP} - \text{BPOP} \times A) \times \text{ANAPI} \quad (1c)$$

食品与饲料的氮磷输入计算模型

$$\text{NFFNI} = f_1(\text{POP}, \text{AGR}, \text{LIV}) \quad (1d)$$

$$\text{NFFPI} = f_2(\text{POP}, \text{AGR}, \text{LIV}) \quad (1e)$$

水体氮磷浓度约束

$$f_3(\text{RNE}, \Phi) \leq \text{SNC} \quad (1f)$$

$$f_4(\text{RPE}, \Phi) \leq \text{SPC} \quad (1g)$$

河流氮磷负荷计算模型

$$\text{RNE} = a_N \times \text{NANI} + b_N \quad (1h)$$

$$\text{RPE} = a_P \times \text{NAPI} + b_P \quad (1i)$$

式中,POP 为人口数量(人);NFFNI 和 NFFPI 分别为流域食品与饲料的氮与磷进口量(kg);BPOP 为流域所在区域的平均人口密度(人·km<sup>-2</sup>);A 为流域面积(km<sup>2</sup>);ANANI 是区域人均氮输入量(kg·人<sup>-1</sup>);ANAPI 为区域人均磷输入量(kg·人<sup>-1</sup>);AGR 和 LIV 分别指流域粮食产量和畜禽养殖规模; $f_1$ 和 $f_2$ 分别为食品与饲料氮和磷进口量计算函数,具体方程参见 NANI 和 NAPI 计算模型(Hong *et al.*, 2012; Howarth *et al.*, 1996, 2012); $f_3$ 和 $f_4$ 分别指湖泊水质模型的氮浓度和磷浓度计算方程;SNC 和 SPC 分别为湖泊氮浓度标准和磷浓度标准(mg·L<sup>-1</sup>);RNE 和 RPE 分别为流域河流氮和磷负荷(kg·a<sup>-1</sup>);NANI 和 NAPI 分别是流域人为氮和磷输入量(kg·a<sup>-1</sup>); $a_N$ 和 $b_N$ 为流域人为氮输入量和河流氮负荷回归模型的系数; $a_P$ 和 $b_P$ 为流域人为磷输入量和河流磷负荷回归模型的系数。

### 3 案例研究(Case study)

#### 3.1 研究区概况

滇池流域位于云南省昆明市境内,地处长江、

红河、珠江三大水系分水岭地带(24°29' N~25°28' N,102°29' E~103°01' E),流域平均海拔 1900 m,面积 2920 km<sup>2</sup>,其中滇池面积 300 km<sup>2</sup>(1887.4 m 水位).滇池流域涉及昆明市的五华区、盘龙区、官渡区、西山区、嵩明县、晋宁县、呈贡县等 7 个区(县),2010 年拥有常住人口 368 万人,地区生产总值为 1600 亿元(当年价),以 0.7%的土地面积承载了云南省的 7.6%的人口和 24%的地区生产总值.滇池自 20 世纪 80 年代以来,在流域人口与经济迅速发展的压力下,湖体氮磷浓度持续上升,营养化水平不断加剧,形成目前周年性水华爆发特征(盛虎等, 2012).经过多年的环境治理努力,湖体有机污染指标 COD 值出现下降,但氮磷营养物浓度仍然居高不下,成为制约流域可持续发展的重要因子。

#### 3.2 模型结构

根据流域氮磷营养盐承载力概念,人口规模最大是承载力优化的主要目标.在本研究中,为体现人口结构和城乡差异,人口规模的构成指标有两项:城镇人口与农村人口.因此,优化目标为最大化流域城镇人口与农村人口之和。

$$\text{Max P} = \sum_i^7 (\text{PURB}_i + \text{PRUR}_i) \quad (2)$$

式中, $i=1,2,3,\dots,7$ 指滇池流域所涉及的 7 个区县,分别指呈贡县、官渡区、晋宁县、盘龙区、嵩明县、五华区和西山区;PURB 和 PRUR 分别指城镇人口和农村人口数量(人)。

流域氮磷营养盐承载力的主要约束条件为流域内外氮磷交换平衡和湖体水环境质量达标,具体如下:

##### (1) 流域内外氮磷交换平衡

$$\text{NFFNIA} + \text{NFFNIP} \leq \left[ \sum_i^7 (\text{PURB}_i + \text{PRUR}_i) - A \cdot \text{BPOP} \right] \cdot \text{ANANI} \quad (3a)$$

$$\text{NFFPI} \leq \left[ \sum_i^7 (\text{PURB}_i + \text{PRUR}_i) - A \cdot \text{BPOP} \right] \cdot \text{ANAPI} \quad (3b)$$

其中,

$$\text{NFFNIA} = \sum_i^7 (\text{PURB}_i \cdot \text{HNCU} + \text{PRUR}_i \cdot \text{HNCR}) \cdot \text{ANP} - \sum_i^7 \sum_j^5 (\text{LSP}_{ij} \cdot \text{LSOR}_j \cdot \text{LSNP}_j) \quad (3c)$$

$$\text{NFFNIP} = \sum_i^7 (\text{PURB}_i \cdot \text{HNCU} + \text{PRUR}_i \cdot \text{HNCR}) \cdot (1 - \text{ANP}) + \sum_i^7 \sum_j^5 (\text{LSP}_{ij} \cdot \text{LSNC}_j) - \sum_i^7 \sum_k^6 (\text{CPA}_{ik} \cdot \text{CPOR}_k \cdot \text{CNP}_k) \quad (3d)$$

$$\text{NFFPI} = \sum_i^7 (\text{PURB}_i \cdot \text{HPCU} + \text{PRUR}_i \cdot \text{HPCR}) + \sum_i^7 \sum_j^5 (\text{LSP}_{ij} \cdot \text{LSPC}_j) - \sum_i^7 \sum_j^5 (\text{LSP}_{ij} \cdot \text{LSOR}_j \cdot \text{LSPP}_j) - \sum_i^7 \sum_k^6 (\text{CPA}_{ik}^+ \cdot \text{CPOR}_k^+ \cdot \text{CPP}_k^+) \quad (3e)$$

(2) 滇池氮磷浓度约束, 滇池的氮磷浓度计算采用了湖泊水质的狄龙模型

$$\frac{I_{cN} \times 1000 \times (1 - R_{cN})}{r_c \cdot V_c} \leq C_N \quad (4a)$$

$$\frac{I_{cP} \times 1000 \times (1 - R_{cP})}{r_c \cdot h_c} \leq C_P \quad (4b)$$

其中,

$$I_{cN} = a_N \cdot NANI + b_N - \sum_{i=1}^7 (\beta_{ui} \cdot RRNU_N \cdot DU_N \cdot PURB_i) - \sum_{i=1}^7 (\beta_{ri} \cdot RRNR_N \cdot DR_N \cdot PRUR_i) \quad (4c)$$

$$I_{cP} = a_P \cdot NAPI + b_P - \sum_{i=1}^7 (\beta_{ui} \cdot DU_P \cdot PURB_i) - \sum_{i=1}^7 (\beta_{ri} \cdot DR_P \cdot PRUR_i) \quad (4d)$$

$$NANI = NFFNI + \sum_i \sum_{k=4}^7 (CPA_{ik} \cdot NFR) + \sum_i \sum_k^6 (CPA_{ik} \cdot FN_k + FN_o) + DEPO \quad (4e)$$

$$NAPI = NFFPI + \sum_i \sum_k^6 (CPA_{ik} \cdot FP_k + FP_o) \quad (4f)$$

(3) 农业生产条件约束

耕地面积

$$\sum_k^6 \frac{CPA_{ik}}{MCI_i} \leq Land_{im}, \forall i, m = 1 \quad (5a)$$

$$Land_{im} \leq \sum_k^6 CPA_{ik}, \forall i, m = 1 \quad (5b)$$

$$CPA_{ik} \leq ILP_i \cdot Land_{im}, \forall i, k = 1, m = 1 \quad (5c)$$

建设用地面积

$$(PURB_i + PRUR_i) \cdot LandP_i \leq Land_{im}, \forall i, m = 2 \quad (6)$$

农村劳动力约束

$$\sum_k^6 (LC_k \cdot CPA_{ik}) \leq LR \cdot PRUR_i, \forall i \quad (7)$$

(4) 技术约束

$$PURB_i \geq 0, \forall i \quad (8a)$$

$$PRUR_i \geq 0, \forall i \quad (8b)$$

$$CPA_k \geq 0, \forall k \quad (8c)$$

$$LSP_j \geq 0, \forall j \quad (8d)$$

式中, NFFNIA 和 NFFNIP 分别为流域内的动物性蛋白质进口量与植物性蛋白质进口量 (以 N 计,  $kg \cdot a^{-1}$ ); PURB 和 PRUR 分别指流域内城镇人口和

农村人口数量 (人); HNCU 和 HNCR 分别指城镇人均食品氮消费量和农村人均食品氮消费量 ( $kg \cdot a^{-1}$ ); HPCU 和 HPCR 分别指城镇人均食品磷消费量和农村人均食品磷消费量 ( $kg \cdot a^{-1}$ ); ANP 表示人类饮食中动物性蛋白质比例; A 和 BPOP 分别指滇池流域面积 ( $km^2$ ) 和区域 (云南省) 平均人口密度 ( $人 \cdot km^{-2}$ ); LSP 为畜禽养殖规模 (头); LSNC 和 LSPC 分别指畜禽饲料的氮和磷消费量 ( $kg \cdot 头(只)^{-1} \cdot a^{-1}$ ); LSOR 为畜禽产品产出率 ( $kg \cdot 头(只)^{-1}$ ); LSNP 和 LSPP 是畜禽产品的氮含量和磷含量; CPA 和 CPOR 分别指粮食作物播种面积 (ha) 和单位面积产量 ( $kg \cdot ha^{-1}$ ); ILP 为水田比例; CPN 和 CPP 是粮食产品的氮含量和磷含量; NFR 为作物固氮系数 ( $kg \cdot hm^{-2}$ ); FN 和 FN<sub>0</sub> 分别指氮肥施用量与作物播种面积的回归系数及其常数项; FP 和 FP<sub>0</sub> 分别指磷肥施用量与作物播种面积的回归系数及其常数项; DEPO 为大气 NO<sub>y</sub> 沉降量 ( $kg \cdot N \cdot a^{-1}$ ); I<sub>cN</sub> 和 I<sub>cP</sub> 分别为 TN 和 TP 的人湖通量 ( $kg \cdot a^{-1}$ ); NANI 和 NAPI 分别为流域人类活动净氮输入量和人类活动净磷输入量 ( $kg \cdot a^{-1}$ ); R<sub>cN</sub> 和 R<sub>cP</sub> 分别指滇池氮和磷的滞留系数; r<sub>c</sub> 和 V<sub>c</sub> 分别为滇池的冲刷速度常数 (水力停留时间的倒数,  $a^{-1}$ ) 和平均水深 (m); C<sub>N</sub> 和 C<sub>P</sub> 指湖泊总氮和总磷浓度标准 ( $mg \cdot L^{-1}$ ); a<sub>N</sub> 和 b<sub>N</sub> 为 NANI 和河流总氮输出量的回归方程系数; a<sub>P</sub> 和 b<sub>P</sub> 为 NAPI 和河流总磷输出量的回归方程系数; RRNU<sub>n</sub> 和 RRNU<sub>p</sub> 分别为城镇生活污水的总氮和总磷削减率; DU<sub>N</sub> 和 DU<sub>P</sub> 分别为城镇人均总氮和总磷排放量 ( $kg \cdot 人^{-1} \cdot a^{-1}$ ); RRNR<sub>N</sub> 和 RRNR<sub>P</sub> 分别为农村生活污水的总氮和总磷削减率; DR<sub>N</sub> 和 DR<sub>P</sub> 分别为农村人均总氮和总磷排放量 ( $kg \cdot 人^{-1} \cdot a^{-1}$ ); MCI 为滇池流域各县区的耕地复种指数; LC 为单位播种面积的农业就业人口 ( $人 \cdot ha^{-1}$ ); LR 为农业就业人口与农村人口回归系数; LandP 为人均建设用地面积 ( $km^2 \cdot 人^{-1}$ ); Land<sub>im</sub> 为土地面积, m = 1, 2 分别表示耕地和建设用地; β<sub>u</sub> 和 β<sub>r</sub> 分别为城镇和农村生活污水收集率; 下标 i, j, k 分别为行政区、畜禽和农作物的编号; 其他参数含义同前文。

### 3.3 优化模型参数估计

滇池流域氮磷承载力优化模型的参数主要包括食品与饲料消费、食品与饲料生产、湖泊水环境模拟、土地利用和污染控制工程等参数。

#### (1) 氮磷消费与生产参数

优化模型中的城镇人口和农村人口的氮磷消

费参数以及畜禽养殖的消费量参数参见文献(高伟等, 2014; Han *et al.*, 2013; Hong *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2014).此外,在该优化模型中,农作物生产模拟部分的参数还新增了农作物播种面积与农产品产量关系和流域所涉 7 个县区的农作物复种指数,具体参数取值来源于滇池流域所涉七个区县 2000—2010 年统计年鉴数据的计算。

### (2) 氮磷排放与环境治理参数

氮磷排放参数包括城镇、农村和各种畜禽养殖类型的氮磷排放系数,主要用于计算流域氮磷排放量。滇池流域城镇与农村人口的 TN 和 TP 排放系数取它们的摄入系数,即假设人的氮磷摄入与排放是相等的(Han *et al.*, 2013; 2014)。畜禽养殖的氮磷排放系数根据排泄比和摄入水平计算,所用的排泄比数据来源于文献(Han *et al.*, 2013; 2014),具体见表 1。本研究主要考虑的环境治理类参数为城镇和农村生活污水收集率和氮磷削减率。对于城镇生活污水,根据《昆明市环境保护与生态建设“十二五”规划》的数据,其污水收集率取 59%。城镇生活污水的氮磷削减率参数是基于滇池流域 6 个污水处理厂 2007—2009 年运行数据计算得到的,经计算城镇生活污水 TN 和 TP 的平均削减率分别为 61% 和 88%;根据滇池流域已经建设的农村生活污水处理设施的数量与运行情况,估算出农村生活污水的收集率为 7%(王丕祥等, 2012)。农村生活污水处理的氮磷削减率根据现有文献(王丕祥等, 2012; 严婷婷等, 2010),确定 TN 和 TP 的削减率分别为 55.5% 和 85.5%。

表 1 滇池流域主要畜禽氮磷排泄比

畜禽	TN 排泄比	TP 排泄比
牛	89%	89%
猪	69%	69%
羊	84%	84%
家禽	65%	65%

### (3) 湖泊水环境参数

湖泊水环境参数是用于计算湖体氮磷浓度的,涉及湖泊深度、容积、冲刷速度常数、氮和磷的滞留系数等。根据滇池流域水污染防治十二五规划,滇池的平均容积为 15.6 亿  $m^3$ ,平均水深 5.3 m。基于文献数据(王苏民, 窦鸿身, 1998),计算出滇池的冲刷系数为  $0.51 a^{-1}$ ,湖体的氮和磷滞留系数分别为 0.89 和 0.74(辜来章, 郝淑英, 1992)。滇池的氮磷输入强

度是根据河流氮磷输出与 NANI 和 NAPI 的回归关系计算的,相关回归系数见表 2。根据地表水环境质量标准(GB3838—2002),湖泊的总氮浓度目标  $C_N$  和总磷浓度目标  $C_P$  标准分别设定为 1 和  $0.05 mg \cdot L^{-1}$ (湖泊 III 类水质标准)。

表 2 滇池流域河流氮磷输出与营养盐人为输入的回归系数  
Table 2 Regression coefficients for riverine export and anthropogenic nutrient inputs in Lake Dianchi Basin

参数名称	平均值	标准差	显著性水平
$a_N$	0.22	0.02	<0.0001
$b_N$	-473.00	146.00	<0.05
$a_P$	0.11	0.02	<0.0001
$b_P$	75.00	28.00	<0.05

注:方程的基本形式为  $y = ax + b$ ,其中  $y$  为河流氮磷输出量, $x$  为 NANI 或 NAPI。

### (4) 土地利用参数

根据城市用地分类与规划建设用地标准(GB50137—2011),人均建设用地设定为  $130 \times 10^{-6} km^2 \cdot 人^{-1}$ 。根据滇池流域的相关研究(Wang *et al.*, 2012),各县区的建设用地的最大面积设定为:56.42、57.92、119.85、69.98、86.31、67.75 和 18.33  $km^2$ 。耕地的最大面积为 8.04、33.81、81.04、24.27、142.79、195.01 和 86.96  $km^2$ 。

考虑农业生产活动与农村人口密切相关,在优化模型中,本研究建立了农村人口-就业-作物种植面积的关系方程,作为约束农村人口变化的条件之一。基于 2008—2013 年昆明市 14 个县区的相关统计数据,计算出流域农村人口与农业就业人口的回归关系,以及农业就业人口与种植业关系,从而将农村人口与农业生产关联起来。其中,农林牧渔业就业人口与农村人口的线性回归系数为 0.44 ( $R^2 = 0.95, p < 0.0001$ ),表明单位农村人口的就业需求为 0.44 人;基于 SPSS 软件,采用逐步回归法获得滇池流域农林牧渔业就业人口与种植业面积多元线性回归方程的参数(调整  $R^2 = 0.90$ )。

### 3.4 流域内外氮磷交换平衡情景下的承载力

基于 3.2 节构建的流域氮磷环境承载力优化模型,以滇池湖体氮磷浓度达标和流域内外氮磷营养盐交换平衡为约束,计算出滇池流域各县区可承载的最大人口总量为 538 万人,其中城镇人口为 367 万人,农村人口为 171 万人。五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡县、晋宁县和嵩明县的总人口规模分别为 49、61、125、64、111、93 和 34 万人,城镇化率为 89%、73%、74%、84%、60%、56% 和 42%。从人口

总量上看,流域的人口承载力比现状流域实际人口(368万,2010年常住人口)高出158万人,相当于现状人口总量132%,说明在一定的氮磷优化管理措施下滇池流域尚有一定的人口数量提升空间.从滇池流域各县区的承载力水平看(图3),官渡区、呈贡县和晋宁县等地区的承载能力较高,造成它们承载力较高主要原因有所差异,其中官渡区的承载力较高是因为其城区发展潜力较大,可承载较多的城镇人口,而呈贡县和晋宁县承载力高是由于其对农村人口的承载力较强.

滇池流域的人口最大化承载目标是以调整农业生产结构为前提条件的,由于畜禽养殖业的污染排放强度高,对氮磷营养盐的转换效率低,滇池流域应全面禁止.然而,从最大限度利用耕地资源的角度,滇池流域可以继续发展一定规模的种植业,但种植结构应当以稻谷为主,其次是薯类.根据优化结果滇池流域的稻谷和薯类种植规模应当分别控制在26648和2047  $\text{hm}^2$ ,五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡县、晋宁县和嵩明县的稻谷种植规模为327、307、1274、936、5766、13894和4143  $\text{hm}^2$ (图3);由于花卉种植对提高农业人口就业率有显著促进作用,优化结果显示各县区可保留较高的花卉种植面积(28498  $\text{hm}^2$ ),其中五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡县、晋宁县和嵩明县的花卉种植规模为477、3074、6830、1491、8513、5607和2506  $\text{hm}^2$ ;此外,嵩明县还可保留2047  $\text{hm}^2$ 的薯类种植.

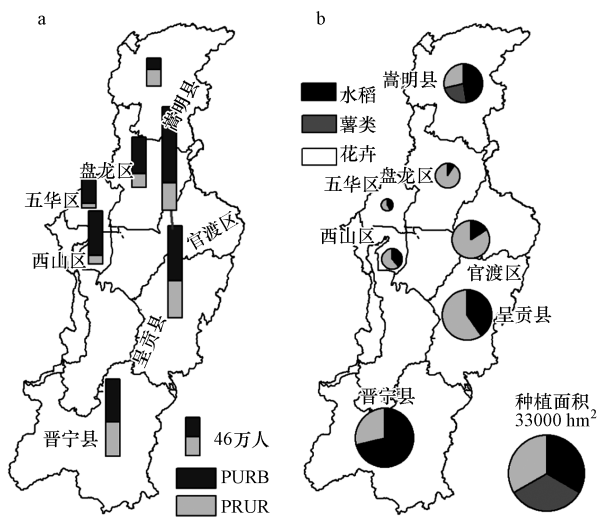


图3 氮磷交换平衡情景下滇池流域作物的人口(a)与种植的种植分布(b)

Fig.3 Population (a) and crop (b) carrying capacity of Lake Dianchi basin under N and P exchange balance

### 3.5 外流域调水情景下的承载力优化

外流域调水是缓解本地水资源压力和水环境质量改善的重要措施,调水可以增加水体的换水周期,从而提高水环境的自净能力.滇池流域为解决当前严重的水资源短缺和湖泊富营养化问题,实施了牛栏江-滇池补水工程,该工程通过115.6 km长的输水线路,将牛栏江干流德泽水库的水引入滇池最大的河流盘龙江,最终进入滇池.牛栏江调水工程是滇池流域水环境治理的重大项目,根据规划设置,牛栏江年均向滇池输水6.0亿  $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ (谢波等,2010).经计算,调水工程实施后,滇池的湖体冲刷系数  $r$  将由  $0.51 \text{ a}^{-1}$  上升到  $1.02 \text{ a}^{-1}$ .

当调水进入滇池后,基于构建的优化模型,保持滇池湖体氮磷浓度达标和流域内外氮磷营养盐交换平衡为约束,计算出滇池流域可承载的最大人口总量为573万人,其中城镇人口为367万人,农村人口为206万人.五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡县、晋宁县和嵩明县的总人口规模分别为54、101、125、63、111、78和40万人,城镇化率为80%、44%、74%、85%、60%、67%和36%.与氮磷平衡情景相比,调水后滇池流域可承载的人口数量出现了显著提升,整体上增加了6%,说明在调水对改善流域的环境承载力的确可以起到一定效果.从滇池流域各县区的承载力水平看(图4),不同县区的承载力变化方向不一致,其中西山区和晋宁县的可承载人口较氮磷平衡情景出现下降,总人口分别下降1%

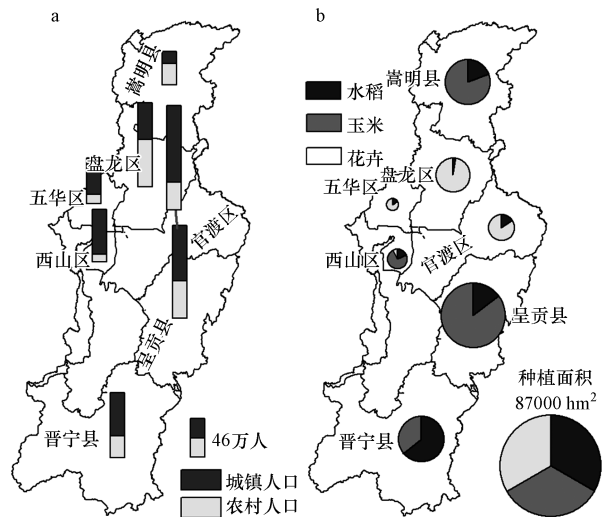


图4 外流域调水情景下滇池流域人口(a)与作物的种植分布(b)

Fig.4 Population (a) and crop (b) carrying capacity of Lake Dianchi basin under water transfer

和 20%, 主要原因是农村人口承载力出现大幅下降; 人口承载力提升幅度最大的是盘龙区, 达到 40%, 其它依次是嵩明县 (15%) 和五华区 (10%), 而官渡区和呈贡县的承载人口规模变化较小。

调水情景下滇池流域农业生产结构调整与氮磷平衡情景较为类似, 全面禁止畜禽养殖业, 保留部分种植业。该情景下流域种植结构应当以稻谷、玉米和花卉为主。根据优化结果, 滇池流域的稻谷、玉米和花卉的总种植规模应当分别控制在 26648、62379 和 21617  $\text{hm}^2$ , 其中稻谷种植面积与氮磷平衡情景一致, 花卉种植面积略有下降 (下降比例为 24%)。五华区、盘龙区、官渡区、西山区、呈贡县、晋宁县和嵩明县的稻谷种植规模与氮磷平衡情景一样, 但西山区、呈贡县、晋宁县和嵩明县应发展玉米种植业, 种植面积分别为 3721、33644、7765 和 17249  $\text{hm}^2$  (图 4); 花卉种植在该情景下仅限于五华区、盘龙区、官渡区和西山区, 种植规模分别为 1787、12608、6830 和 391  $\text{hm}^2$ ; 其它作物类型应禁止种植。

### 3.6 氮磷回收利用情景下的承载力

流域的经济社会系统既是氮磷的消费者, 也是氮磷的生产者, 这种特性为氮磷的循环利用提供了可能。目前, 氮磷的循环利用手段主要是以农家肥的形式利用人或畜禽的粪便, 一方面降低了对化学肥料的需求, 进而减少了流域氮磷输入强度; 另一方面, 减少了氮磷进入水体的量, 弱化了氮磷输入对水环境的影响。因此, 这种氮磷回收行为在一定程度上闭合了流域的氮磷循环, 提高了氮磷利用效率。为研究氮磷转移与流域承载力的关系, 分析了不同氮磷回收利用率 (氮磷回收利用量与排放量的比值) 下的流域氮磷承载力情况, 所得结果如图 5 所示。

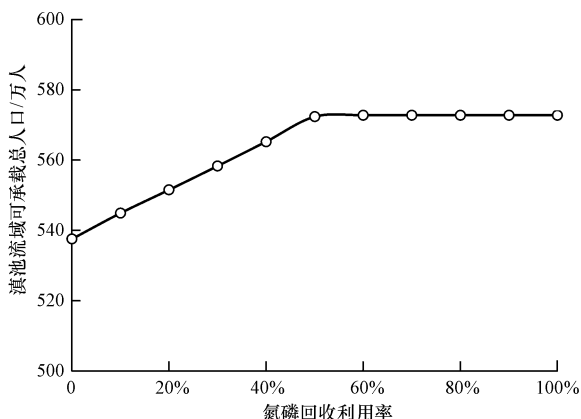


图 5 滇池流域承载力与氮磷回收利用率关系

Fig.5 Trade-off between carrying capacity and nutrient recycling rate of Lake Dianchi basin

当流域氮磷回收利用率提高时, 滇池流域的可承载人口不断扩大, 特别是在氮磷回收利用率为 0~50% 之间时, 可承载人口数量从 538 万人增长到 573 万人, 由此说明提高氮磷回收利用率有利于增强流域的人口承载能力。然而, 这种措施潜力是有限的, 当氮磷回收利用率超过 50% 时, 流域可承载的人口数量与氮磷回收利用率不再有响应关系, 因为此时流域的人口不受到氮磷浓度约束, 而是受流域土地利用的限制。

### 3.7 污水外排情景下的承载力

目前, 滇池流域的草海污水外排是削减污染物进入滇池的重要措施之一。为进一步分析氮磷转移与流域承载力的关系, 本研究模拟了不同污水外排情景下的流域氮磷承载力情况 (图 6)。

污水外排情景下, 流域的人口容量最大可扩充到 573 万人, 其中城镇和农村人口为 367 和 206 万人。由此说明, 简单的外排污水确实能够达到提升承载力的目的。但是从污水外排率与承载人口的关系看, 这种潜力是非常有限的, 当污水外排率超过 70%, 即使提高污水外排率, 可承载的人口数量也不会增加, 因为此时流域的承载力受到其它约束条件的限制。此外, 与调水情景和氮磷回收利用情景的模拟结果相比, 污水外排情景并不能实现比其它措施更高的承载力目标。综上, 流域氮磷营养盐的境内外交换对流域自身的承载能力确实有明显影响, 但这种以污染转移为手段的控制措施并没有显著的优势。

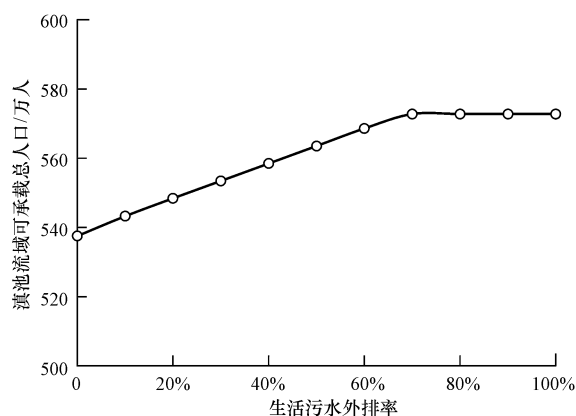


图 6 滇池流域承载力与污水流域外排放率关系

Fig.6 Trade-off between carrying capacity and sewage transfer rate of Lake Dianchi basin

在滇池的案例研究中, 滇池湖体被概化为一个湖体, 没有区分草海和外海以及它们的集水范围。因



此,计算所得结果是基于流域整体的平均情况,今后的研究可进一步考虑草海和外海集水范围的不同,从而制定更具针对性的政策建议。

#### 4 结论(Conclusions)

1)以氮磷为湖泊流域的特征污染物,结合开放系统和环境承载力的相关理论,提出了流域氮磷营养盐承载力概念,认为开放流域的氮磷承载力是指在流域内外氮磷营养盐交换平衡的前提下,流域水环境氮磷含量达标情况下所能承载的最大人口规模。该概念弥补了当前环境承载力研究中对流域内外交互关系考虑的不足,为研究人类活动与环境介质中氮磷的关系提供了一种新的评估手段。

2)基于氮磷承载力的概念,构建了以人口规模最大化为目标,以流域内外氮磷交换平衡和环境氮磷浓度达标为约束的承载力优化模型。滇池流域的氮磷承载力研究结果表明,流域的最大的人口承载能力为 538 万人,相对于现状 2010 年可提升 32%。

3)外流域调水可在一定程度上提升流域的氮磷环境承载力。在牛栏江调水情景下,滇池流域可承载的人口数量出现了显著提升,相对于不调水增加了 6%,主要原因是调水缩短了滇池的换水周期,滇池的湖体冲刷系数  $r$  将由  $0.51 \text{ a}^{-1}$  上升到  $1.02 \text{ a}^{-1}$ 。

4)提高流域氮磷回收利用率有利于提高环境承载能力。在流域氮磷回收利用率为 0~50% 范围内,滇池流域的氮磷环境承载力与氮磷回收利用率成正比,可承载人口数量从 538 万人增长到 573 万人。然而,这种措施潜力是有限的,当氮磷回收利用率超过 50% 时,流域可承载的人口数量不受到氮磷浓度约束,而是受流域土地利用的限制。

5)污染转移行为能够实现流域氮磷环境承载力提高的目的,但不具备显著优势。研究表明在一定的范围内(生活污水流域外排放率 0~70%),滇池流域的氮磷环境承载力与污水外排率成正比。然而,与其他情景相比,污水外排情景并不能实现更高的承载力目标,说明流域氮磷营养盐的境内外交换对流域自身的承载能力确实有明显影响,但这种以污染转移为手段的控制措施并没有显著的优势,且不利于整体的可持续发展。滇池流域的环境改善应立足流域内的产业结构优化和污染控制。

**责任作者简介:**郭怀成(1963—),男,教授,博士生导师,从事环境规划与管理研究,主要研究方向为水环境与水生生态模拟、流域环境规划与生态系统管理、流域污染物输移模拟与

湖泊富营养化控制等,发表论文共 200 余篇(其中 SCI 论文 78 篇)。

#### 参考文献(References):

- 安宝晟,程国栋. 2014. 西藏生态足迹与承载力动态分析[J]. 生态学报, 34(4): 1002-1009
- 陈颢,任志远,郭斌. 2011. 陕西省近 10 年来水资源足迹动态变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 25(3): 43-48
- 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 2010. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报, 65(1): 82-90
- 段新光,栾芳芳. 2014. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境, 24(3): 119-122
- 高鹭,张宏业. 2007. 生态承载力的国内外研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 17(2): 19-26
- 高伟,郭怀成,后希康. 2014. 中国大陆市域人类活动净氮输入量(NANI)评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 50(5): 951-959
- Gao W, Howarth R W, Hong B, *et al.* 2014. Estimating net anthropogenic nitrogen inputs (NANI) in the Lake Dianchi basin of China[J]. Biogeosciences, 11(16): 4577-4586
- Gao W, Howarth R W, Swaney D P, *et al.* 2015. Enhanced N input to Lake Dianchi Basin from 1980 to 2010: Drivers and consequences[J]. Science of the Total Environment, 505: 376-384
- 辜来章,郝淑英. 1992. 滇池水域营养盐负荷平衡的研究[J]. 云南环境科学, 11(1): 8-15
- 郭怀成,高伟,王真,等. 2012. 流域可持续性理想域和现实状态测度[J]. 地理研究, 31(11): 1929-1940
- 郭怀成,尚金城,张天柱. 2001. 环境规划学[M]. 北京: 高等教育出版社.
- Han Y, Fan Y, Yang P, *et al.* 2014. Net anthropogenic nitrogen inputs (NANI) index application in Mainland China[J]. Geoderma, 213(SI): 87-94
- Han Y, Yu X, Wang X, *et al.* 2013. Net anthropogenic phosphorus inputs (NAPI) index application in Mainland China [J]. Chemosphere, 90(2): 329-337
- Hong B, Swaney D P, Morth C, *et al.* 2012. Evaluating regional variation of net anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs (NANI/NAPI), major drivers, nutrient retention pattern and management implications in the multinational areas of Baltic Sea basin[J]. Ecological Modelling, 227: 117-135
- Howarth R W, Billen G, Swaney D, *et al.* 1996. Regional nitrogen budgets and riverine N&P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences [J]. Biogeochemistry, 35(1): 75-139
- Howarth R, Swaney D, Billen G, *et al.* 2012. Nitrogen fluxes from the landscape are controlled by net anthropogenic nitrogen inputs and by climate[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 10(1): 37-43
- 焦雯珊,闵庆文,成升魁,等. 2011. 污染足迹及其在区域水污染压力评估中的应用——以太湖流域上游湖州市为例[J]. 生态学报, 31(19): 5599-5606

- Lassaletta L, Billen G, Romero E, *et al.* 2014. How changes in diet and trade patterns have shaped the N cycle at the national scale: Spain (1961-2009) [J]. *Regional Environmental Change*, 14 (2SI): 785-797
- 李磊, 贾磊, 赵晓雪, 等. 2014. 层次分析—熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. *长江流域资源与环境*, 23(4): 456-460
- 刘东, 封志明, 杨艳昭. 2012. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J]. *自然资源学报*, 27(4): 614-624
- 盛虎, 郭怀成, 刘慧, 等. 2012. 滇池外海蓝藻水华爆发反演及规律探讨[J]. *生态学报*, 32(1): 56-63
- 石建屏, 李新. 2012. 滇池流域水环境承载力及其动态变化特征研究[J]. *环境科学学报*, 32(7): 1777-1784
- Wackernagel M, Yount J D. 1998. The ecological footprint: An indicator of progress toward regional sustainability [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 51(1-2): 511-529
- Wang Z, Gao W, Cai Y, *et al.* 2012. Joint optimization of population pattern and end-of-pipe control under uncertainty for Lake Dianchi water-quality management[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 21(12): 3693-3704
- 汪宇明, 赵中华. 2007. 基于上海案例的大都市旅游容量及承载力研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 17(5): 118-122
- 王春娟, 冯利华, 罗伟. 2012. 长三角经济区水资源承载力的综合评价[J]. *水资源与水工程学报*, 23(4): 38-42
- 王奎峰, 李娜, 于学峰, 等. 2014. 基于 P-S-R 概念模型的生态环境承载力评价指标体系研究——以山东半岛为例[J]. *环境科学学报*, 34(8): 2133-2139
- 王丕祥, 和兰娣, 支国强, 等. 2012. 滇池流域农村分散污水处理现状调查[J]. *环境科学导刊*, 31(5): 49-52
- 王苏民, 窦鸿身. 1998. 中国湖泊志[Z]. 科学出版社.
- 王西琴, 高伟, 曾勇. 2014. 基于 SD 模型的水生态承载力模拟优化与例证[J]. *系统工程理论与实践*, 34(5): 1352-1360
- 王西琴, 高伟, 何芬, 等. 2011. 水生态承载力概念与内涵探讨[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 9(1): 41-46
- 韦静, 曾维华. 2009. 生态承载力约束下的区域可持续发展的动态模拟——以博鳌特别规划区为例[J]. *中国环境科学*, 29(3): 330-336
- 肖玲, 赵先贵, 许华兴. 2013. 山东省碳足迹与碳承载力的动态研究[J]. *生态与农村环境学报*, 29(2): 152-157
- 谢波, 顾世祥, 苏建广. 2010. 牛栏江——滇池补水工程可调水量分析[J]. *人民长江*, 41(15): 15-18
- 徐大海, 王郁. 2013. 确定大气环境承载力的烟云足迹法[J]. *环境科学学报*, 33(6): 1734-1740
- 徐琳瑜, 康鹏. 2013. 工业园区规划环境影响评价中的环境承载力方法研究[J]. *环境科学学报*, 33(3): 918-930
- 严婷婷, 王红华, 孙治旭, 等. 2010. 滇池流域农村生活污水产排污系数研究[J]. *环境科学导刊*, 29(4): 46-48
- 杨亮, 吕耀, 郑华玉. 2010. 城市土地承载力研究进展[J]. *地理科学进展*, 29(5): 593-600
- 曾维华, 杨月梅. 2008. 环境承载力不确定性多目标优化模型及其应用——以北京市通州区区域战略环境影响评价为例[J]. *中国环境科学*, 28(7): 667-672
- 张会涓, 陈然, 赵言文. 2012. 基于模糊物元模型的区域水环境承载力研究[J]. *水土保持通报*, 32(2): 186-189
- 朱一中, 夏军, 王纲胜. 2005. 张掖地区水资源承载力多目标情景决策[J]. *地理研究*, 24(5): 732-740