

城镇化背景下滇池流域生态系统健康

评价指标体系研究¹

雷冬梅¹, 徐晓勇²

(1. 云南财经大学 城市与环境学院, 云南 昆明 650221;

2. 云南大学 发展研究院, 云南 昆明 650091)

【摘要】: 城镇化的快速发展对云南省滇池流域生态系统健康状况产生的影响日益突出和严重。在明晰流域生态系统健康概念及特征的基础上, 阐述了城镇化背景下滇池流域生态系统健康评价指标体系的构建思路与选取原则。主要是: ①以自然条件限制因子—城镇化影响因子—流域生态系统健康指示因子为评价结构, 依据流域水、土和生物资源禀赋特征; ②城镇化对流域土地利用、对流域水资源的质和量、对流域景观结构的影响; ③流域健康的五大要素即活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能和人类健康, 构建了滇池流域生态系统健康评价指标体系, 期为云南省滇池流域的生态健康评价及生态建设提供科学依据。

【关键词】: 健康流域; 生态系统; 评价指标; 城镇化; 滇池流域

【中图分类号】: X826.2 **【文献标志码】**: A **【文章编号】**: 1005-8141 (2018) 07-0902-05

1、引言

在全球生态系统健康状况日益恶化的严峻形势下, 流域生态系统健康评价逐渐成为生态学领域的一个研究热点^[1-4], 其中健康评价指标体系的构建是该领域重要的研究内容之一^[4, 5]。目前, 不同流域生态系统健康评价在国内已经展开^[3, 6, 7], 但涉及滇池流域的很少。虽然有学者对滇池流域的生态系统健康进行了初步评述^[8], 但却未形成健康评价指标体系。

云南省滇池流域是典型的高原湖滨区, 是云南省城市化水平最高的区域, 城镇化进程对流域的影响非常突出, 特别是滇池水环境恶化与富营养化问题已威胁到整个流域的生态系统健康状况, 并制约着湖滨地区社会经济的可持续发展^[8, 9]。相关研究表明, 随着城镇化水平的不断提高, 城镇化将导致流域内人口急剧集中、产业集中、社会经济活动强度增大, 带来一系列的资源短缺及环境污染等生态环境问题^[10]。流域城市化的结果, 特别是城镇化过程中对水土资源的不合理开发利用, 将大规模引起流域内生态环境的变化以及资源形态、结构和功能的变化, 甚至干扰生态系统的进化过程, 严重影响到流域生态系统的健康^[7, 11]。因此, 基于城镇化背景下, 研究滇池流域生态系统健康评价的指标体系选择, 对滇池流域的生态保护与合理开发具有重要的理

¹【收稿日期】: 2018-05-09;

【修订日期】: 2018-06-25

【基金项目】: 云南省自然科学基金项目 (编号: 2015FB148) 资助。

【第一作者及通讯作者简介】: 雷冬梅 (1979-), 女 (畲族), 福建省三明人, 生态学博士, 副教授, 主要研究方向为土地生态学。

论与现实意义。

本文在明晰流域生态系统健康内涵的基础上,试图构建较完整的适用城镇化背景下的滇池流域生态系统健康评价指标体系,以期对滇池流域的生态系统健康与可持续发展提供科学依据,同时也为其他具有相似基质的流域生态系统健康评价提供参考与借鉴。

2、流域生态系统健康

流域作为由分水线所包围的河流集水区,是一个独立的地貌单元,具有生态完整性,同时也是人类社会活动相对活跃的区域,是典型的社会—经济—自然复合生态系统^[12]。与单一生态系统如草地、森林、农田等相比较,流域生态系统的纵向连续性、生物结构特殊性、自我修复性、关系复杂性和动态平衡性等特征更加突出^[13, 14]。

不同学者对流域生态系统健康的定义与特征的理解不同,目前尚未对流域生态系统健康形成统一的认识。归根溯源,关于流域生态系统健康的定义可追溯到生态系统健康的定义上。关于生态系统健康,美国生态学家 Rapport 认为,它是指一个生态系统所具有的稳定性和可持续性。即在时间上具有维持生态系统组织结构、自我调节和对胁迫的恢复能力,可通过活力、组织结构和恢复力三个特征来定义^[3, 5, 15, 16]。而与罗跃初、周忠轩、孙轶等学者^[2]提出的流域生态系统健康 6 条特征不同,肖凤勃、欧阳华^[17]认为如果一个生态系统是稳定、持续和活跃的,能维持生态系统的组织结构,受到干扰后能在一段时间内自动修复,则这个流域生态系统就是健康的。王文杰、张哲、王维等学者^[4]在综合分析已有研究的基础上,指出流域生态系统健康是指区域处于良好的平衡状态,主要表现在三个方面:生态系统结构完整、功能完善、面对自然和人为的适度干扰具备弹性恢复力。

本文认为,针对一般生态系统而言,对受人为影响较大的流域生态系统,生态系统的健康不仅意味着为人类提供生态服务的生态系统的健康和完整,也意味着人群健康。若前者受到威胁或破坏,后者就得不到保障。综合已有的研究,本文将流域生态系统健康的特征理解为五大要素:①具有活力。生态系统的活力是表征流域生态系统的自然、经济、人口的再生产能力以及物质与能量流动的效率,健康的流域意味着具有一定的活力。②结构完整。流域是一个由河网水系作为廊道,将陆域、岸边带和水域相连接而构成的相对独立和完整的集水区域,结构完整意味着流域内空间镶嵌的各类生态系统及其整体能保存关键生态组分与结构,且远离疾病,流域上下游以及陆域和河流水域保持密切的联系^[4]。③功能完善。生态系统服务功能反映流域生态系统满足人类需求的程度。健康的流域意味着能稳定地提供

人类生存和发展需要的水、土地、森林等自然资源,维持涵养水源、保持水土、净化环境等服务功能^[3, 5]。④具备弹性恢复力。恢复力表示生态系统系统在自然灾害、资源紧张、环境污染等问题发生后如何将危害减少到最低程度,即系统抵抗自然灾害和处理生态环境问题的能力。健康的流域意味着面对自然和人为的适度干扰具有一定的恢复力。⑤维持一定的人类健康。流域生态系统的改变能影响人类健康,健康的流域应有能力维持人类的健康,人类的健康本身可作为流域生态系统健康的反映,可从身体健康和文化水平两方面来反映流域城镇化地区人群的整体健康状况^[18]。

3、滇池流域生态系统健康评价指标体系构建

3.1 研究区概况

滇池流域位于云贵高原中部,地处 102° 36′ -102° 47′ E、24° 40′ -25° 02′ N 之间,位于长江、珠江和红河三大水系分水岭地带^[19, 20]。流域南北长 114km,东西平均宽 25.6km,涉及昆明市主城区(包括五华、盘龙、官渡、西山四区)、呈贡区和晋宁县“五区一县”等县市区部分地区,流域面积 2840.7km²。整个流域为南北长、东西窄的湖盆地,地形可分为山地丘陵、淤积平原和滇池水域 3 个层次。滇池是该流域主要的水域组成部分,面积为 250km²^[20]。全流域均为昆明市所辖,在云南全省的经济社会发展中占有举足轻重的地位。

20 世纪 80 年代以来, 昆明市的快速城市化对滇池流域的自然水文循环造成了严重的干扰和破坏, 主要表现在: 河流生态系统功能退化、水体污染, 特别是滇池水体富营养化问题日益严重, 生态用地面积减少, 水土流失情况严重, 主要河流密度、曲度锐减等, 已经成为制约滇池流域可持续发展的重要因素^[19, 21, 23]。

3.2 评价指标体系构建思路

根据流域生态系统健康的概念与特征, 基于滇池流域城镇化的背景, 本文以“自然条件限制因子—城镇化影响因子—流域生态健康指示因子”为评价指标, 建立了流域生态系统健康评价体系。该评价指标综合考虑了滇池流域生态系统禀赋特征和城镇化的影响, 通过健康指示因子反映流域的健康状况^[16, 24]。健康指示因子包括以下 5 个方面的要素: 活力、组织结构、恢复力、生态系统功能的维持和人群健康状况^[4, 7, 17, 25]。

3.3 指标选取原则

主要是: ①完整性与可识别性原则。从遵循生态系统的一般规律出发, 切实反映流域生态系统的本质特性与区域特征。②简明性和可操作性原则。选择关键性的具有综合性的指标, 使建立的指标体系简单明了、有较强的可比性、参数易于获取、便于计算与分析等。③主导性原则。流域生态系统是一个非常复杂的系统, 决定系统特征的因子很多。指标应考虑其在城镇化背景下对自然生态系统质量和社会经济系统的表征、刻画作用以及内在联系和因果关系, 提取信息量大、综合性强的指标。④敏感性原则。选取的指标应对生态环境变化具有敏感性, 同时也具有一定的稳定性。

3.4 评价指标的选择

根据评价体系构建思路与指标选取原则, 本文将云南省滇池流域的生态系统健康评价体系分解为

自然条件限制因子、城镇化影响因子、流域生态健康指示因子等三个结构层次: ①自然条件限制因子主要是反映滇池流域的生态系统禀赋特征和先天条件, 是流域生态系统健康状况的决定性因素之一, 从水、土和生物资源禀赋对流域健康的制约来选择指标。②城镇化影响因子主要是反映城镇化对流域土地利用的影响、对流域水资源的质和量的影响、对流域景观结构的影响来选择指标。③流域生态健康指示因子主要是综合反映流域的健康状况, 应选择较为敏感的反映流域生态系统健康状况和变化趋势的指标, 从流域生态系统健康的五大要素来考虑指标的选配, 即活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能和人类健康。根据三个结构层次选择相应的指标, 最终形成滇池流域生态系统健康评价指标体系(表 1)。

表 1 滇池流域生态系统健康评价指标体系

目标层	结构层	要素层	指标层	指标解释
滇池 流域 生态 系统 健康 综合 指标	自然条件 限制因子	水资源禀赋	多年平均降雨量	反映流域地表水资源量多寡的制约
		土资源禀赋	土壤平均厚度	反映流域植物生长的制约
		生物资源禀赋	森林覆盖率	反映流域生态系统森林状况的制约
	城镇化 影响因子	土地利用	耕地面积比例	反映城镇化对流域耕地的影响
			建设用地比例	反映城镇化对流域建设用地的影响
			湖滨带干扰指数	反映城镇化对流域湖滨带的干扰强度
		水资源	水质状况指数	反映工业废水和生活污水排放对水环境质量的 影响
			水资源开发利用率	反映流域水资源的开发利用程度
		景观格局	不透水面比例	反映流域地表的人为硬化程度

流域生态 健康指示 因子	活力	河道连通性指数	反映城镇化对流域自然河道的干扰状况
		景观破碎度	反映城镇化对流域陆地生态系统完整性状况的影响
	组织结构	植被净第一性生产力 NPP	反映流域自然生态生产力
		人均 GDP（万元）	反映流域社会经济生产力
		最大斑块指数	反映流域最大面积的景观类型斑块
		斑块结合度指数	反映流域斑块的物理连接度
	恢复力	Simpson 多样性指数	反映流域土地利用类型复杂性和多样性
		高功能景观斑块分维数和优势度	反映流域景观中对发挥生态系统功能较大的土地覆盖/利用类型
	生态系统服务功能	生态弹性度	反映流域景观水平生态恢复力综合指标
		雨水资源利用率	反映流域社会经济恢复力
		环保投入占 GDP 比重（%）	反映流域社会经济恢复力
	人类健康	水资源涵养功能指数	反映流域水资源涵养的能力
		水土保持功能指数	反映流域水土保持的能力
		环境质量综合指数	反映流域净化城市环境质量的能力
		人均水资源占有量	反映流域提供水资源的能力
	人类健康	恩格尔系数	反映流域人群健康
		0-4 岁儿童死亡率	反映流域人群健康
		传染病发病率	反映流域人群健康
		义务教育普及率	反映流域人群文化水平

3.5 部分指标的机理解释

多年平均降雨量：多年平均降雨量是滇池流域重要的水资源禀赋特征指标，主要反映流域地表水资源量多寡的制约情况。滇池是典型的宽浅型高原湖泊，入湖水量主要来源于流域的自然降水^[26]。整个滇池流域的水资源严重匮乏，水资源总量约为 5.55 亿 m³，人均水资源量仅 155m³，属水资源严重缺乏地区。

湖滨带干扰指数：湖滨带干扰指数主要是指湖滨带内建设用地与农田面积之和占湖滨带面积的比例。湖滨带是流域生态系统中湖泊的重要缓冲区，对湖泊生态环境防护具有重要意义。随着城镇化进程的加快，滇池流域湖滨带地区城镇用地面积大幅增加，在增加非点源污染负荷的同时，使残留在地面的非点源污染物更易于被汇集到河道，进入湖泊，直接导致自然生态系统不堪重负而失去了自我调节的能力^[20, 27]。

水质状况指数：水质状况指数主要是指 DI 类及以上水质断面数占流域全部断面数的比例。滇池位于昆明市主城区下游，湖体成为城市污染物唯一的最终受纳体。20 世纪 70 年代以来，随着城镇化进程的加快，滇池水体富营养化日益突出^[26]，已成为制约滇池流域可持续发展的重要影响因素^[22]。滇池流域的主要污染物有 COD_{Cr}、NH₃-N、TN、TP（化学需氧量、氨氮、总氮、总磷）。

河道连通性指数：河道连通性指数是反映城镇化过程对自然河道的干扰状况，用每公里河道的闸坝个数表示^[9]。注入滇池的河流有 20 余条，主要有盘龙江、东白沙河、宝象河、马料河、捞鱼河、梁王河、大河、柴河、东大河、西北沙河、新河、运粮河等，新河和运粮河主要为昆明的排污河道，各河流呈向心状注入滇池，而滇池唯一的出湖河道为海口河。这种极度封闭性决定了河道连通性是滇池流域生态系统健康评价的一个重要指标。

植被净第一性生产力 NPP: NPP 是指绿色植物在单位时间、单位面积上由光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分。流域的潜在植物净第一性生产力较多,当植被遭受破坏时,该流域的植被恢复可能较快。因此,与 NPP 较小的流域相比,滇池流域的生态系统健康程度较高,具体计算公式见相关参考文献^[7]。

生态弹性度:生态弹性度是反映滇池流域景观水平生态恢复力的一项综合指标。根据滇池流域不同的土地利用类型(建成区、农用地、林地、荒草地、裸地、水体)对生态恢复的贡献和作用^[28],分别赋予不同级别的生态恢复力值,然后得出反映生态恢复力的综合指数,指数值越大表示恢复力越强^[3, 5],具体计算公式见相关参考文献^[3]。

景观格局指数:景观格局指数是符合流域尺度特征的生态结构指标。流域是由河网作为衔接廊道,由不同生态系统,如森林、湿地、城镇等构成的综合景观。在构建评价指标体系时,需要考虑景观生态系统的廊道、斑块等景观组成与空间格局,针对水域、岸边带和陆域的结构特征,将该生态系统的类型组成及空间格局纳入进来^[4]。近年来随着滇池流域内的城镇化进程加速,建设用地不断扩张,农田、草地等面积日益减少,已造成流域景观破碎化程度加剧、景观结构不合理及其功能退化等问题^[29]。根据滇池流域的特点,在类型水平和景观水平上分别选取以下指标:最大斑块指数,表示流域内各个类型中最大斑块占流域总面积的百分比;斑块结合度指数,反映流域斑块的物理连接度。如果流域具有高连接度(即物理连接度未受到损害,生物有机体能在纵向、横向和垂直方向自由移动),则流域生态系统越健康。具体的计算方法见相关参考文献^[30];景观破碎度,反映滇池流域中陆域生态系统的完整性状况。由森林、草地等自然植被的斑块数除以滇池流域陆域的面积来获得;Simpson 多样性指数主要是反映滇池流域土地覆盖/利用类型的复杂性和多样性的指标,具体的计算方法见相关参考文献;在高功能景观斑块分维数和优势度方面,高功能景观斑块是景观中对发挥生态系统功能贡献较大的土地覆盖/利用类型,因此常被用于对景观结构指标的计算^[31]。高功能景观斑块分维数和优势度分别从形状上、面积与斑块数量比例上反映了滇池流域高功能景观斑块的复杂性和异质性^[3, 5],具体的计算方法见相关参考文献^[32]。

水源涵养功能指数:水源涵养功能指数与植被覆盖度、植被类型和不透水面积有关,具体计算公式见相关参考文献^[9]。流域生态系统水源涵养功能主要表现在拦蓄降水、调节径流、影响降水量、净化水质等方面,同时对改善水文状况和调节区域水分循环也起着非常重要的作用。对滇池流域来说,滇池的水源涵养功能与植被类型密切相关。由于该区域地处北回归线附近,处于全球生态系统脆弱地区,加上人为因素的影响,滇池流域的地带性植被由常绿阔叶林向云南松林发生次生演替,反映了生境条件由湿性向旱性的逆向演替^[19],水源涵养功能发生了显著变化。

水土保持功能指数:水土保持功能指数是反映滇池流域土壤水土保持的能力。与流域内不同程度的土壤侵蚀面积有关,具体计算公式见相关参考文献^[9]。水土流失是滇池流域重要的生态问题之一,也是导致滇池流域水环境恶化的重要因素。研究表明,滇池流域的水体污染分为点源污染、面源污染和内源污染,其中面源污染是主要的污染源,而水土流失则是滇池面源污染的主要来源,占面源污染总量的 80%^[23]。

4、小 结

滇池流域是一个典型的自然—社会—经济复合生态系统,是云南省城镇化水平最高的区域,滇池流域生态系统健康评价的目的是为了生态恢复与管理,并实现流域的可持续发展,而基于城镇化背景下建立科学的指标体系是生态系统健康评价的关键与基础。

本文在明晰健康流域生态系统健康特征的基础上,基于滇池流域的城镇化背景,建立了以“自然条件限制因子—城镇化影响因子—流域生态系统健康指示因子”为结构的较为完整的评价指标体系,为滇池流域生态系统健康评价提供了有价值的参考。该评价体系体现了滇池流域的禀赋特征,突出了城镇化是评价流域生态系统健康的原始压力,也体现了流域生态系统健康的五大要素特征。

综上所述,需要注意的是:①滇池流域生态系统健康的影响因素较多,本文提出的指标体系主要是针对城镇化进程的影响;健康状况是一种动态过程,滇池流域不同时期的主要影响因子不同,在实际应用中应根据影响因子的不同进行调整。②作为宏观尺度的生态系统健康研究,本评价指标体系虽然有效地反映了复杂生态系统的特征,但是需要对各组成要素的特征、相互作用而形成的网络关系等各种信息进行进一步整合与研究,更加突出与景观生态学相结合,更加突出遥感和地理信息系统等新技术和新方法的应用。

[参考文献]:

[1]Rapport D J , Costanza R , McMichael A J .Assessing Ecosystem Health[J].Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13 (10) : 397-402.

[2]罗跃初,周忠轩,孙轶,等.流域生态系统健康评价方法[J].生态学报,2003,23(8):1606-1614.

[3]方炫,李壁成,赵世伟,等.黄土高原小流域生态系统健康评价指标体系研究[J].生态经济,2009,(10):32-34,39.

[4]王文杰,张哲,王维,等.流域生态健康评价框架及其评价方法体系研究(一)——框架和指标体系[J].环境工程技术学报,2012,2(4):271-277.

[5]李壁成,方炫.黄土高原乡村生态系统健康评价指标体系与生态经济功能区试验研究[C].2011 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷).2011.

[6]李春晖,郑小康,崔嵬,等.衡水湖流域生态系统健康评价[J].地理研究,2008,27(3):565-573.

[7]龙笛,张思聪,樊朝宇.流域生态系统健康评价研究[J].资源科学,2006,28(4):38-44.

[8]许申来.城市化背景下滇池流域生态系统健康重建思考[J].云南地理环境研究,2011,23(6):70-73.

[9]解雪峰,蒋国俊,肖翠,等.基于模糊物元模型的西苕溪流域生态系统健康评价[J].环境科学学报,2015,35(4):1250-1258.

[10]郑小康,李春晖,黄国和,等.流域城市化对湿地生态系统的影响研究进展[J].湿地科学,2008,6(1):87-96.

[11]章茹,蒋元勇,万金保,等.城镇化过程对鄱阳湖流域生态系统的影响[J].长江流域资源与环境,2014,23(3):400-406.

[12]陈美球,许莉,刘桃菊,等.基于PSR框架模型的赣江上游生态系统健康评价[J].江西农业大学学报,2012,34(4):839-845.

[13]魏晓华,孙阁.流域生态系统过程与管理[M].北京:高等教育出版社,2009.

[14]陈美球,刘桃菊,许莉.基于PSR框架模型的流域生态系统健康评价研究现状及展望[J].农林经济管理学报,2011,10(3):83-89.

[15]Rapport D J .Ecosystem Health: Exploring the Territory[J].Ecosystem Health, 1995, 1 (1) : 5-13.

-
- [16]段树国, 奚秀梅. 塔里木河流域生态系统健康评价指标体系的构建[J]. 云南地理环境研究, 2007, 19 (5) : 114-117.
- [17]肖风劲, 欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法[J]. 自然资源学报, 2002, 17 (2) : 203-209.
- [18]郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态系统健康评价初探[J]. 中国环境科学, 2002, 22 (6) : 525-529.
- [19]刘会玉, 王充, 林振山, 等. 基于 RS 和 GIS 的滇池流域水土流失动态监测[J]. 南京师大学报 (自然科学版), 2012, 35 (2) : 120-124.
- [20]张 洪, 雷冬梅, 黎海林, 等. 滇池流域建设用地景观格局与滇池水质关系分析[J]. 水土保持通报, 2013, 33 (4) : 103-107.
- [21]许申来, 李王锋, 赵晓飞. 滇池流域生态建设与城市空间发展研究[C]. 2012 中国环境科学学会学术年会论文集 (第二卷). 2012.
- [22]郭怀成, 孙延枫. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨[J]. 地理科学进展, 2002, 21 (5) : 500-506.
- [23]徐旌, 张军, 刘燕, 等. 基于 RS, GIS 的滇池流域水土流失变化研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18 (2) : 80-83.
- [24]韩丽君, 曹先柱, 张玉萍. 灵石县静升流域生态系统健康评价研究[J]. 山西水土保持科技, 2012, (1) : 22-24.
- [25]孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 等. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报, 2002, 13 (4) : 486-490.
- [26]何佳, 徐晓梅, 杨艳, 等. 滇池水环境综合治理成效与存在问题[J]. 湖泊科学, 2015, 27 (2) : 195-199.
- [27]郑丙辉, 鄧永宽, 郑凡东, 等. 滇池流域生态环境动态变化研究[J]. 环境科学研究, 2002, 15 (2) : 16-18.
- [28]张珂, 赵耀龙, 付迎春, 等. 滇池流域 1974-2008 年土地利用的分形动态[J]. 资源科学, 2013, 35 (1) : 232-239.
- [29]刘杰, 叶晶, 杨婉, 等. 基于 GIS 的滇池流域景观格局优化[J]. 自然资源学报, 2012, 27 (5) : 801-808.
- [30]鲁韦坤, 杨树华. 滇池流域景观格局变化研究[J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2006, 28 (S1) : 211-218.
- [31]田静毅, 王立新, 王继彬. 小流域生态安全景观指标的提取方法研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14 (5) : 40-42.
- [32]肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等. 景观生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 56.