

引用格式:袁睿佳. 松华坝水库流域非点源污染景观空间负荷[J]. 资源科学, 2019, 41(2): 405-413. [Yuan R J. Location-weighted landscape index of non-point source pollution in Songhuaba Reservoir watershed[J]. *Resources Science*, 2019, 41(2): 405-413.] DOI :10.18402/resci.2019.02.18

松华坝水库流域非点源污染景观空间负荷

袁睿佳

(云南财经大学国土资源与持续发展研究所,昆明 650221)

摘要:为保障松华坝水库流域的饮水安全,促进滇池流域水污染的防治工作,本文以非点源污染为研究对象,通过专家打分法分析不同景观在该流域非点源污染形成中的贡献,并确定各“源”、“汇”景观的比重,以景观空间负荷对比指数为基础,分别从流域整体与各景观空间要素2个方面,定量研究了流域景观格局与非点源污染的关系。结果显示:①松华坝水库流域整体和各空间要素层面的4个景观空间负荷指数值均小于0.50,表明流域在整体和各景观空间要素层面,均属于“污染截留型”景观格局,即理论上由当前景观格局新产生并排出的非点源污染物极少;②坡度景观空间负荷指数>相对高程景观空间负荷指数>距离景观空间负荷指数,表明加强保护该流域中高海拔陡坡地带的“汇”景观,不仅可以防止形成新的“污染贡献型”景观格局,还可强化其隔离圈式“污染截留型”景观格局,有效阻挡流域中面积最大的“源”景观,位于中高海拔山区的旱地所产生的土壤和养分外流。

关键词:非点源污染;“源”“汇”景观格局;景观空间负荷指数;洛伦兹曲线理论;松华坝水库流域

DOI :10.18402/resci.2019.02.18

1 引言

目前我国正面临非常严峻的水污染问题。水污染已经同旱灾、洪灾被并列称为水灾害^[1-4]。城市水源区水环境及生态环境的好坏对于城市人民的生存、城市的持续发展至关重要^[5]。松华坝水库是昆明市最大的城市用水供应水源,占总供水量的52%,最高时达70%,水库水质的好坏直接关系昆明市约700万常住城市人口的饮水卫生和安全,同时,作为滇池流域最大的水源保护和水源涵养林区,松华坝水库还影响着滇池水体的自净能力,以及滇池流域的水污染防治工作。

松华坝水库水质自1991年开始下降,1996年至今多为Ⅲ类水^[6],富营养化趋势明显^[7],尤其枯水期水质较差^[8],偶尔降至Ⅳ类水。水环境污染与水资源短缺的双重压力限制了昆明市的城市发展和功能提高。

定量描述景观格局与生态过程间的关系既是当前研究的难点,也是热点。2003年陈利顶等以非点源污染为典型生态过程,借用洛伦兹曲线理论,从距离、相对高度和坡度3个方面建立了不受尺度限制的景观格局评价模型——景观空间负荷对比指数^[9],实现了对流域景观空间分布格局与生态过程(非点源污染)间关系的定量研究。2006年陈利顶等完善了“源”“汇”景观理论,并指出该理论提出的主要目的是探究不同景观类型在空间上的动态平衡对生态过程的影响,从而找到各区域的最适景观空间格局^[10]。2007年岳隽等通过对深圳西丽水库流域景观空间负荷对比指数的研究,证实不同尺度的景观空间分异特征可显著影响“源”“汇”景观在非点源污染输出和削减贡献程度间的对比关系,从而影响水体质量^[11]。2009年陈利顶等对黑龙江省海伦市传统农业区中2个小流域进行了景观格局与

收稿日期:2018-11-12;修订日期:2018-12-15

基金项目:云南省科技计划项目(2010ZC096);云南省教育厅科学研究基金项目(2010C048);云南财经大学引进人才“科研启动费”项目(YC2011D26)。

作者简介:袁睿佳,女,云南昆明人,博士,副教授,主要从事景观生态学与土地资源管理研究。E-mail: Ruijia_yuan@163.com

生态过程整合的对比研究,发现流域中“源”景观和“汇”景观的空间布局是控制径流水质的关键;景观空间负荷指数与流域雨季地表水质衡量指标(TN, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-Na}$ 和 TP)呈正相关;同时指出对土壤侵蚀区、营养流失“源”和高风险流域的识别可为减轻非点源污染负荷提供量化指标,进一步证明景观空间负荷指数可实现景观格局与生态过程(非点源污染)关系的定量研究^[12]。2013年李明涛等利用CCA排序和路径分析等统计方法,分析了密云水库上游潮河流域不同水平景观格局与非点源污染过程的相关关系,进一步细化了不同水平景观格局与非点源污染过程的关系^[13]。

为保障松华坝水库流域的饮水安全和昆明市社会经济的可持续发展,急需从流域景观格局的角度定量研究流域的非点源污染负荷,规范流域的水空间管理,以实现流域水和土的联合管理。本文借助“3S”技术,通过分析不同景观及其空间分布格局在流域非点源污染形成中的地位和作用,确定各“源”、“汇”景观比重,以陈利顶等运用洛伦兹曲线演变而得的景观空间负荷对比指数为基础,分别从流域整体与各景观空间要素2个方面对松华坝水库流域景观空间分异特征与非点源污染负荷关系进行定量研究。

2 研究区概况、数据来源与处理

2.1 研究区概况

松华坝水库建于1959年,属金沙江流域长江水系,距昆明市区15 km^[8]。水库坝高47 m,总库容0.68亿m³,多年平均径流量2.1亿m³,正常年来水占滇池年交换量的42%以上,是昆明市主要饮用水源地,是云南省最大的蓄水工程和水利枢纽工程。

松华坝水源保护区建于1981年,为省级自然保护区,地处102°45'E-102°59'E, 25°08'N-25°27'N之间,南北长36 km,东西宽24 km^[14],总面积586.63 km²,占滇池流域面积的20.09%。行政区主要涉及昆明市嵩明县和盘龙区的滇源镇、阿子营乡、松华

乡、龙泉办事处和双龙乡,共计45个村委会,325个村小组^[15]。松华坝水库流域东与嵩明县杨桥乡接壤,南与盘龙区毗邻,北与寻甸山水相连,西北角与富民县相交。水源保护区属亚热带季风气候,雨量分配不均,降雨多集中在汛期(5-10月),占年降水量的80%以上^[16]。

水源区非点源污染主要包括林区地表土壤流失,农业非点源污染,生活垃圾、污水及畜禽造成的非点源污染。

2.2 数据来源与处理

本研究以2017年过境,轨道号为129-43,空间分辨率为15 m的Landsat-8 OLI影像为数据源,以1:5万的地形图、DEM图和水系图为辅,通过人机交互、监督分类的影像解译法获取松华坝水库流域土地利用类型图作为基础数据。土地利用类型包括耕地、园地、林地、草地、工矿仓储用地、住宅用地、交通运输用地、水域和其他土地9个一级类型,以及12个二级类型(GB/T21010-2007)。

由于坡度、距离和相对高程的空间分异特征对非点源污染物的产生和输移有重要影响,研究基于DEM数据,利用ArcGIS软件对松华坝水库流域的坡度、距离和相对高程进行分级处理,并针对此3类景观空间要素,以分析不同景观空间分异格局带来的非点源污染负荷。

根据我国《县级土地利用总体规划编制规程》^[17],按照山区、山地利用情况和松华坝水库流域的实际情况,将其坡度分为五级:I级,0°≤坡度<8°;II级,8°≤坡度<15°;III级,15°≤坡度<25°;IV级,25°≤坡度<35°;V级,坡度≥35°。

以松华坝水库流域出口为原点,100 m为间隔,运用ArcGIS软件对0~38 500 m的距离面图层做缓冲处理。为便于对比分析,与坡度的五级分类相统一,将距离面均分为五等份(表1)。

与距离面分级原则同理,将研究区高程范围均分五级(表2)。

表1 松华坝水库流域距离面分级

Table 1 Distance classes in Songhuaba Reservoir watershed

(m)

	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
距离	0~7 700	7 701~15 400	15 401~23 100	23 101~30 800	30 801~38 500

2019年2月

表2 松华坝水库流域相对高程面分级

Table 2 Relative elevation classes in Songhuaba Reservoir watershed

(m)

	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
相对高程	1 885~2 076	2 077~2 267	2 268~2 458	2 459~2 649	2 650~2 840

3 研究方法

景观空间负荷指数的核心是借助不同景观在非点源污染物产生和输移过程中所起的不同作用来判断不同景观空间分异特征对非点源污染的影响。具体计算过程:首先,识别研究区的“源”、“汇”景观,对比分析各“源”、“汇”景观对非点源污染物输出/削减的相对贡献程度,确定各自比重;其次,计算各“源”、“汇”景观面积累积百分比曲线与坐标轴所围合的不规则三边形面积,以分析各景观对非点源污染过程的贡献量。最后,综合坡度、距离、相对高程3类空间要素的景观空间负荷,判定流域格局(污染平衡型,污染截留型、污染贡献型)。

3.1 “源”、“汇”景观的识别与比重

陈利顶等^[10]基于生态平衡理论,借鉴大气污染研究中的“源”、“汇”理念,把格局与过程研究中能产生、促进生态过程发展的景观认定为“源”景观;相对地,把对生态过程起负向滞缓作用的景观认定为“汇”景观。

针对松华坝水库流域非点源污染物的产生和输移,将本研究中12种土地利用类型分为“源”景观、“汇”景观和“媒介”景观。河流水面为“媒介”景观,认为它在养分流失过程中,既无“源”作用,也无“汇”作用,仅起传输作用,故研究中不考虑该土地利用类型,忽略其对养分输出和削减的作用。

通过对比相关资料^[10,11,18]中各景观对非点源污染物输出和削减的状况(如氮流失量、磷流失量和水土流失量等),分别以水浇地和有林地作为“源”景观和“汇”景观的参照标准,依靠专家打分法为其他“源”、“汇”景观(土地利用类型)赋予比重(表3)。

3.2 洛伦兹曲线在非点源污染控制中的应用

以研究流域非点源污染这一生态过程为例,对任何流域来说,“源”、“汇”景观的空间分布位置总是可以与流域出口(监测点)的空间位置相比较,并可计算出处于不同景观空间要素(距离、相对高程

和坡度)中的各景观在该流域中分布的面积累积百分比,如图1^[9]所示,O(0.00)表示流域出口(监测点),横坐标(OC)可分别表示景观与流域出口(环境监测点)的距离、相对高程或坡度,3类空间要素的面积累积百分比(取值范围0~100);纵坐标(OA)表示景观的面积累积百分比(取值范围0~100);ODB、OFB两条弧线分别表示不同景观的面积累积百分比曲线。它们对生态过程的贡献量将取决于各景观的面积累积百分比曲线与直线OC、CB所围成的不规则三边形(ODBC和OFBC)的面积大小。

表3 松华坝水库流域非点源污染“源”、“汇”景观类型及其比重

Table 3 ‘Source’ and ‘sink’ landscape of non-point source pollution and their weights of Songhuaba Reservoir watershed

景观类型	土地利用类型	比重
“源”景观	水田	0.30
	水浇地	0.90
	旱地	0.60
	果园	0.40
	采矿用地	0.70
	住宅建设用地	1.00
“汇”景观	裸地	0.60
	有林地	0.90
	灌木林地	0.50
	灌草丛	0.30
	水库、坑塘	1.00

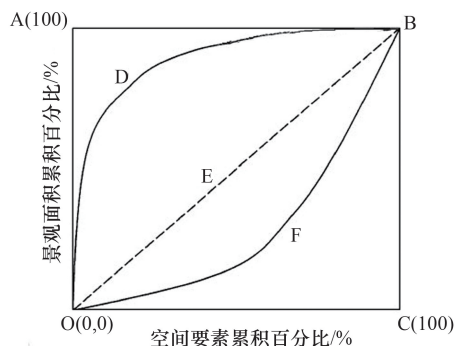


图1 流域中“源”、“汇”景观空间分布示意

Figure 1 Sketch of spatial distribution of ‘source’ and ‘sink’ landscape in a watershed

3.3 景观空间负荷指数计算方法

若假设图1中 ODB 和 OFB 曲线分别代表一个流域中“源”景观和“汇”景观,即可用景观空间负荷指数(LWLI)表示景观空间格局与流域出口养分流失(或土壤侵蚀)的关联。

$$LWLI = A_{源} / [A_{源} + A_{汇}] \quad (1)$$

式中:LWLI为景观空间负荷指数,在一个流域中因需要分别考虑距离、相对高程和坡度3类景观空间要素,故LWLI也相应分为3类,即LWLI_{距离}、LWLI_{相对高程}和LWLI_{坡度};A_源和A_汇分别代表不规则三边形 ODBC (假设为“源”景观)和 OFBC (假设为“汇”景观)的面积。

由公式(1)可知,景观空间负荷指数(LWLI)的值域为0~1,值越大表示该流域出口的养分流失量相对越大,即该景观格局便于非点源污染物的输移,易于发生养分的流失。对于距离景观空间负荷指数和相对高程景观空间负荷指数,以上结论均可成立;然而,对于坡度景观空间负荷指数以上结论则不成立,相反,坡度景观空间负荷指数越大,说明景观处于坡度较小的位置,所产生的水土或养分流失较小,则该景观格局对非点源污染的输移阻碍越大,越难发生养分流失^[12]。

另外,不同的“源”、“汇”景观对土壤、养分流失的输出/削减量不同,各景观在流域中所占比例对其所产生非点源污染物的贡献也有较大影响。为了能更准确地反映各景观对非点源污染负荷的贡献量,将公式(1)调整为公式(2):

$$LWLI_{距离/相对高程/坡度} = \frac{\sum_{i=1}^m A_{源i} \times W_i \times AP_i}{\left[\sum_{i=1}^m A_{源i} \times W_i \times AP_i + \sum_{j=1}^n A_{汇j} \times W_j \times AP_j \right]} \quad (2)$$

式中:A_{源i}和A_{汇j}分别表示流域中,对应3类景观空间要素(距离、相对高程、坡度),第i种“源”景观和第j种“汇”景观在“源”、“汇”景观空间分布示意图中所对应的面积累积百分比曲线与直线OC、CB所围成的不规则三边形面积;m表示有m种“源”景观,n表示有n种“汇”景观;W_i和W_j分别为第i种“源”景观和第j种“汇”景观的比重;AP_i和AP_j则分别为第i种“源”景观和第j种“汇”景观在流域中所占面积比例。

当流域中“源”景观和“汇”景观在非点源污染物的流失和截留作用上贡献相当时,景观空间负荷指数值等于0.50^[12],为平衡型景观格局,可命名为“均匀分布型”格局,其面积累积百分比曲线将为“源”、“汇”景观空间分布图(图1)中的OEB对角线,即“源”景观所流失的养分在离开流域出口前完全被“汇”景观所截留,养分流在空间尺度上呈平衡状态,流域出口基本没有非点源污染物排出。若流域中景观空间负荷指数大于0.50,说明“源”景观的贡献大于“汇”景观,可命名为“污染贡献型”格局,流域中有明显的非点源污染物由流域出口排出;若景观空间负荷指数小于0.50,则可命名为“污染截留型”格局,此时的景观格局在养分流失作用上的表现与“均匀分布型”格局相似,即流域出口将排出极少量,甚至不排出非点源污染物。综上所述,当景观空间负荷指数小于或等于0.50时,理论上流域出口将基本不产生养分流失。

对距离景观空间负荷指数和相对高程景观空间负荷指数,值越大表示该流域出口的养分流失量相对越大,而对坡度景观空间负荷指数则相反,坡度景观空间负荷指数越大,越难发生养分流失。在综合考虑坡度、距离、相对高程对生态过程的作用后,得到景观空间负荷指数计算公式如下:

$$LWLI = LWLI_{距离} \times LWLI_{相对高程} / LWLI_{坡度} \quad (3)$$

4 结果及分析

4.1 各景观在三类景观空间要素中的分布状况

流域内各景观在各距离段的分布状况如图2与表4所示:水田、水浇地和果园为能充分利用人工水利工程,分布靠近流域出口,以果园表现最为突出。优势“源”景观(旱地),以及有林地、灌木林地、灌草丛等“汇”景观则均匀散布于各距离段内。

如表5所示,流域内绝大部分景观分布于海拔2649 m以下。多数“源”景观分布海拔较低,除旱地与采矿用地外,均集中于海拔2076 m以下。有林地、灌木林地等“汇”景观则分布海拔较高,主要集中于2077~2649 m高程段内。原因是松华坝水库流域相对高差较大,而流域内当地居民并不富裕,经济收入较低、来源较少,在保护区建立以前,低海拔地段乱砍滥伐等严重破坏原生植被的现象时有发生。

2019年2月

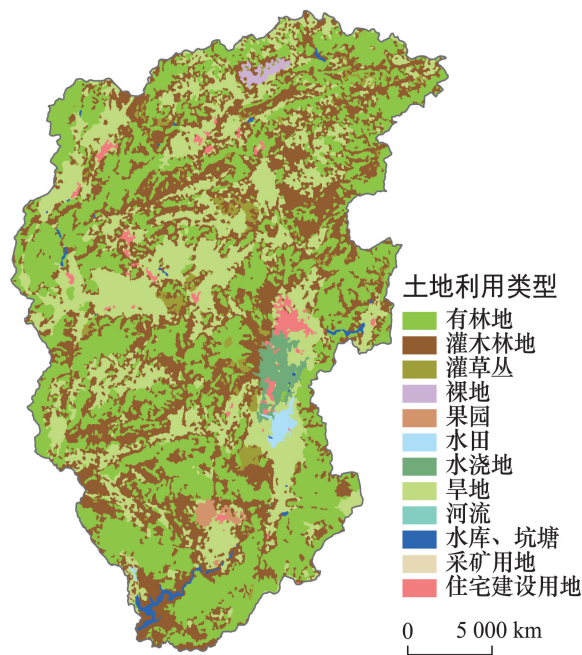


图2 2017年松华坝水库流域土地利用类型

Figure 2 The land use type of Songhuaba Reservoir watershed in 2017

生,而中、高海拔段内的原生或次生林则因其相对海拔优势得到较好的保存。

如表6所示,流域内绝大部分景观都趋向分布于坡度小于25°的地带,除90%左右的水田、水浇地和住宅建设用地分布于8°以下的缓坡外,其他8类景观对坡度要求均不高。尤其有林地、灌木林地、灌草丛等“汇”景观基本均匀散布于35°以下的各坡度地段。

4.2 景观空间要素层面的景观空间负荷指数

如图3所示,松华坝水库流域内各景观的相对高程和坡度曲线基本分布于左上半区,即各曲线顶点偏向接近于A点分布,说明流域内多数景观基本分布于中高海拔(2458 m)以下的缓坡区(15°以下)。水田和水浇地等“源”景观表现得更为突出。而有林地和灌木林地等“汇”景观则倾向分布于人为干扰较小的中高海拔、较陡峭地带。

与相对高程和坡度相比,距离要素层面的各景观面积累积百分比曲线分布不够集中,其分布更靠

表4 2017年松华坝水库流域各距离段内各景观累积面积百分比

Table 4 The area-accumulated percentage of different landscapes in different distance classes of Songhuaba Reservoir watershed in 2017 (%)

距离面等级	水田	水浇地	旱地	果园	有林地	灌木林地	灌草丛	采矿用地	住宅建设用地	水库、坑塘	裸地
I级	6.08	0.00	6.58	4.21	13.93	13.57	2.32	3.57	0.48	61.28	0.00
II级	61.05	5.61	30.46	100.00	43.02	38.20	24.21	16.29	7.71	64.72	0.00
III级	100.00	100.00	65.91	100.00	65.40	59.77	52.25	37.10	79.81	89.94	0.00
IV级	100.00	100.00	92.45	100.00	87.92	89.29	86.94	59.85	100.00	95.14	4.15
V级	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表5 2017年松华坝水库流域各相对高程段内各景观累积面积百分比

Table 5 The area-accumulated percentage of different landscapes in different relative elevation classes of Songhuaba Reservoir watershed in 2017 (%)

相对高程面等级	水田	水浇地	旱地	果园	有林地	灌木林地	灌草丛	采矿用地	住宅建设用地	水库、坑塘	裸地
I级	100.00	98.43	24.94	75.59	9.49	13.36	9.11	2.07	66.94	82.51	90.63
II级	100.00	100.00	81.26	100.00	61.16	66.02	76.83	25.77	97.54	99.82	100.00
III级	100.00	100.00	93.70	100.00	89.80	87.79	93.34	66.73	100.00	100.00	100.00
IV级	100.00	100.00	98.20	100.00	95.50	97.30	99.96	87.47	100.00	100.00	100.00
V级	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表6 2017年松华坝水库流域各坡度段内各景观累积面积百分比

Table 6 The area-accumulated percentage of different landscapes in different slope classes in 2017 (%)

坡度等级	水田	水浇地	旱地	果园	有林地	灌木林地	灌草丛	采矿用地	住宅建设用地	水库、坑塘	裸地
I级	95.97	90.51	54.71	48.30	8.49	19.00	24.40	28.89	88.74	86.09	27.27
II级	96.61	96.76	84.86	80.00	28.25	47.80	67.63	67.25	97.03	90.30	66.16
III级	98.39	99.59	98.23	98.18	72.16	84.14	93.50	92.77	99.75	95.96	97.58
IV级	100.00	100.00	99.88	99.95	96.47	97.71	99.49	99.48	100.00	99.34	100.00
V级	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

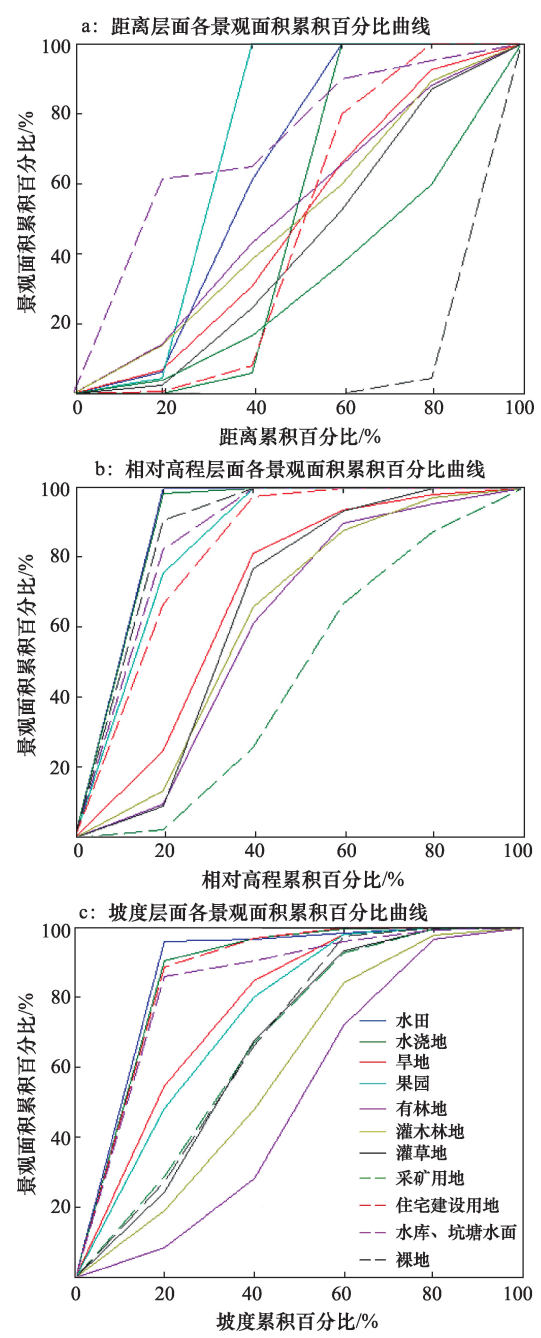


图3 松华坝水库流域各景观面积累积百分比曲线
Figure 3 Distribution curves of different landscapes by area-accumulated percentage in the Songhuaba Reservoir watershed

近对角线OEB的左右两侧,说明距离对果园和水田以外其他景观的分布基本没有限制,各景观分布格局与距流域出口的距离相关性较低,基本呈随机分布,没有靠近流域出口的倾向。

通过统计松华坝水库流域内各景观所占面积比例(AP_i 和 AP_j),及其对应3类景观空间要素的不规则三边形面积($A_{源i}$ 和 $A_{汇j}$)(表7)可获得松华坝水库流域对应距离、相对高程、坡度的景观空间负荷指数值分别为0.24($LWLI_{距离}$)、0.28($LWLI_{相对高程}$)、0.32($LWLI_{坡度}$),3类空间要素的景观空间负荷指数值均小于0.50,说明研究区在各景观空间要素层面均为“污染截留型”景观格局。理论上,目前水库流域,由“源”景观新流失的土壤/养分在从流域出口排出前,均可被该3类景观空间要素中各自的“汇”景观所截留,最终,流域出口排出的非点源污染物微乎其微。

4.3 流域景观空间负荷指数

综合考虑坡度、距离、相对高程后,由景观空间负荷指数公式(3)计算所得的流域景观空间负荷指数值(0.20)依旧小于0.50,再次说明,松华坝水库流域整体属于“污染截留型”景观格局,即目前理论上,松华坝水库流域中的“汇”景观可基本阻挡其“源”景观所产生的土壤/养分向外流失,由该景观格局新产生的非点源污染物基本不从流域出口排出。

5 结论与讨论

昆明是严重缺水的城市之一,对松华坝水库非点源污染的研究却大多停留在非宏观层面对N、P等个别指标的研究;或者借助生活污水、垃圾采样,结合农业人口数估算TN、TP以解析污染负荷的研究方法上。为了保障昆明市的饮水安全与滇池水体的自净能力,为了达到流域水和土的联合管理,本研究将松华坝水库流域的景观格局分析与生态过程研究进行结合,从流域整体出发,运用不受尺

表7 松华坝水库流域各景观面积累积百分比曲线的面积对比

Table 7 Area-comparison of different landscapes area-accumulated percentage in Songhuaba Reservoir watershed											
景观类型	水田	水浇地	旱地	果园	有林地	灌木林地	灌草丛	采矿用地	住宅建设用地	水库坑塘	裸地
AP_i/AP_j	0.44	1.21	23.75	0.39	39.32	30.91	1.79	0.09	1.16	0.57	0.37
距离	0.63	0.51	0.49	0.71	0.52	0.50	0.43	0.33	0.48	0.72	0.11
$A_{源i}/A_{汇j}$ 相对高程	0.90	0.90	0.70	0.85	0.61	0.63	0.66	0.46	0.83	0.87	0.88
坡度	0.88	0.87	0.78	0.75	0.51	0.60	0.67	0.68	0.87	0.84	0.68

2019年2月

度限制的景观空间负荷指数,定量分析了该流域景观格局与非点源污染负荷间的关系,基本实现了面状景观格局与点状监测数据的有机结合,得出以下结论:

(1)由流域整体和3类景观空间要素的景观空间负荷指数值均小于0.50可知,松华坝水库流域无论在整体还是各景观空间要素层面,均属于“污染截留型”景观格局,即理论上该流域由当前景观格局新产生并排出的非点源污染物极少。

(2)由流域内各景观的面积累积百分比曲线分布状况可知,松华坝水库流域中多数“源”景观更倾向分布于中低海拔缓坡区,但没有靠近流域出口分布的特征。“汇”景观则倾向分布于中高海拔、陡峭地带,与流域出口的距离关系呈随机分布。

(3) $LWLI_{\text{坡度}} > LWLI_{\text{相对高程}} > LWLI_{\text{距离}}$,说明松华坝水库流域从各景观空间要素对非点源污染负荷的贡献来看,各景观所处坡度和相对高程,比其距流域出口的距离影响更为显著,即该流域高海拔、陡坡地带的景观类型对非点源污染负荷的影响更大,应成为非点源污染防治工作的重点对象。

(4)虽然松华坝水库流域依旧保留着部分水浇地、旱地、住宅建设用地等“源”景观,且旱地比例不低(23.75%),但研究结果却显示,目前理论上流域出口几乎没有新产生的非点源污染物排出,究其原因,第一,自2006年2月起昆明市开始执行“松华坝水库保护条例”,将研究区划分为一、二、三级保护区,分区规范管理,并严格实行了封山育林、退耕还林、林分改造,发展了水源涵养林和水土保持林,通过生态补偿将原本分布于水库附近(有明显水资源优势)的“源”景观(以农用地为代表)大量迁出、还林,所保留下来以水浇地和住宅建设用地为代表的高污染负荷型“源”景观虽然位于低海拔缓坡地带,但其加和面积仅占流域总面积的3.00%左右,所生产的景观空间负荷总量很小;而所保留面积最大的“源”景观(旱地),则非点源污染负荷中等,并主要散布于离水库较远,海拔为2077~2458 m,坡度为8~25°的中高海拔山区中。同时,该条例规定严禁在一级保护区内洗涤、放牧;严禁在二级保护区内设置畜禽养殖场、洗矿、挖沙、采石、取土;严禁在三级保

护区内开垦土地、破坏植被;另外,对进入水源保护区的外来人员及车辆实行有效控制,种种措施使农业生产等活动产生的非点源污染得到了有效控制。第二,流域得益于自身起伏、陡峭的地势,相对平坦区域较难连接成片,该地貌使占流域面积27.41%的“源”景观,只能小面积散布于占流域面积72.59%的“汇”景观中,而其中面积最大的“源”景观(旱地)因其所处海拔、坡度均不低,被非点源污染负荷削减能力很强的有林地和灌木林地等“汇”景观分隔,形成了面状“汇”景观如隔离带般环抱、隔绝点状“源”景观的空间格局,所以,即便是面积不小的旱地所富余流失的土壤/养分也能得到“汇”景观地有效阻挡,最终极少向外排出。

(5)尽管研究结果显示,松华坝水库流域由当前景观格局新产生并排出的非点源污染物微乎其微,但并不代表该水库中之前留存的污染物已消除完全。因此,仍需严格执行《松华坝水库保护条例》,不断扩大治理成效;另外, $LWLI_{\text{坡度}} > LWLI_{\text{相对高程}} > LWLI_{\text{距离}}$ 的研究结果,可提醒政府部门和学者们更清晰地认识到,对位于该流域中高海拔、陡坡地带“汇”景观(植被)的保护只可加强,不可松懈。因为,维持并不断强化该流域特有的不规则隔离圈式“污染截留型”景观格局,不但能防止形成新的“污染贡献型”景观格局,还能使位于中高海拔山区,该流域中非点源污染负荷贡献最大的“源”景观(旱地)所流失的土壤/养分得到充分阻挡,不至于向外排出。

(6)景观空间负荷指数虽然可以较好地具有面状特性的景观格局与点状监测数据有机结合,但它毕竟是一个纯粹由研究区的“源”、“汇”景观类型、景观格局,以及景观面积比例对其产生的非点源污染负荷进行综合衡量的相对指数,因此,它更适用于对同一研究区不同时段对比监测,或对自然、社会、经济条件极为相似的邻近区域的对比研究。对于不同流域景观空间负荷指数值相同的情况,除需考虑因流域面积不同,可能导致实际产生的非点源污染负荷不同外;还需具体考虑不同流域中同类“源”、“汇”景观对非点源污染负荷的实际贡献不同在比重赋值时的体现;以及考虑各流域坡度、距离、相对高程的范围与分级不同对 $A_{\text{源}i}$ 和 $A_{\text{汇}j}$ 产生的影响;最后还得考虑不同区域不同降雨量、

不同土壤性质对土壤侵蚀的影响等因素,因此,景观空间负荷指数在不同流域间的对比应用仍有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 薛选世. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告[J]. 中国水利, 2000, 2(8):1-21. [Xue X S. The report of comprehensive research of sustainable development strategy of China water resources[J]. *China Water Resources*, 2000, 2(8): 1-21.]
- [2] 沈光范. 我国水污染防治战略与技术发展趋势[EB/OL]. (2006-09-13)[2018-11-12]. http://www.hbzhan.com/Tech_news/Detail/239.html. [Shen G F. Water Pollution Control Strategy and Technology Development Trend[EB/OL]. (2006-09-13)[2018-11-12]. http://www.hbzhan.com/Tech_news/Detail/239.html.]
- [3] 刘昌明, 何希吾. 中国21世纪水问题方略[M]. 北京: 科学出版社, 1998. [Liu C M, He X W. Water Problems Strategy of China in the 21st Century[M]. Beijing: Science Press, 1998.]
- [4] 尚广萍, 尚金城. 加强流域规划SEA, 促进水资源与水环境问题的解决[C]. 北京: 第一届环境影响评价国际论坛论文集, 2005. [Shang G P, Shang J C. Strengthening Watershed Planning SEA, Improving the Solution for the Water Environment Problems[C]. Beijing: Proceedings of the First International Symposium on Environmental Impact Assessment, 2005.]
- [5] 王金南, 万军, 张惠远, 等. 中国生态补偿政策评估与框架初探[A]. 庄国泰, 王金南. 生态补偿机制与政策设计国际研讨会论文集[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. [Wang J N, Wan J, Zhang H Y, et al. Policy Evaluation and Framework Discussion of Ecological Compensation Mechanism in China[A]. Zhuang G T, Wang J N. International symposium proceedings of Ecological Compensation Mechanism and Policy Design[C]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.]
- [6] 昆明市环保局. 昆明市主城区集中式生活饮用水水源水质状况[EB/OL]. (2018-10-29)[2018-11-12]. <http://www.kmepb.gov.cn/c/2018-10-29/2789082.shtml>. [Kunming Environmental Protection Bureau. Water Quality Status of Centralized Drinking Water Source in Main Urban Area of Kunming[EB/OL]. (2018-10-29)[2018-11-12]. <http://www.kmepb.gov.cn/c/2018-10-29/2789082.shtml>.]
- [7] 刘楚文. 松华坝水库水源区面源污染的防治[J]. 水资源保护, 2007, 23(6): 23-27. [Liu C W. Non-point source pollution control in water source area of Songhuaba Reservoir[J]. *Water Resources Protection*, 2007, 23(6): 23-27.]
- [8] 孔桂芬. 松华坝水库水质现状及变化趋势分析[J]. 云南环境科学, 2006, 25(S1): 116-118. [Kong G F. Present situation and trend analysis of water quality in Songhuaba Reservoir[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2006, 25(S1): 116-118.]
- [9] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法: 景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413. [Chen L D, Fu B J, Xu J Y, et al. Location-weighted landscape contrast index: A scale independent approach for landscape pattern evaluation based on "Source-Sink" ecological processes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2406-2413.]
- [10] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武, 等. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449. [Chen L D, Fu B J, Zhao W W, et al. Source-sink landscape theory and its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444-1449.]
- [11] 岳隽, 王仰麟, 李贵才, 等. 不同尺度景观空间分异特征对水体质量的影响: 以深圳市西丽水库流域为例[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 341-351. [Yue J, Wang Y L, Li G C, et al. The influence of landscape spatial difference on water quality at differing scales: A case study of Xili reservoir watershed in Shenzhen City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 341-351.]
- [12] Chen L D, Tian H Y, Fu B J, et al. Development of a new index for integrating landscape patterns with ecological processes at watershed scale[J]. *Chin. Geogra. Sci*, 2009, 19(1): 37-45.
- [13] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2296-2306. [Li M T, Wang X Y, Liu W Z. Relationship between landscape pattern and non-point source pollution loads in the Chaohe River Watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8): 2296-2306.]
- [14] 范东文. 昆明市松花坝水源保护区多学科综合考察与研究总报告[R]. 昆明: 昆明市环境保护局, 1988. [Fan D W. The General Report of Multidisciplinary Investigation and Research of Songhuaba Water Source Protection Area in Kunming[R]. Kunming: Kunming Environmental Protection Bureau, 1988.]
- [15] 包立, 康宏宇, 胡兴钢, 等. 昆明市松华坝水库流域氮磷非点源污染产生负荷估算[J]. 环境科学导刊, 2015, 34(3): 1-6. [Bao L, Kang H Y, Hu X G, et al. The load estimation of nitrogen and phosphorus from non-point sources in the Songhuaba Reservoir Watershed[J]. *Environmental Science Survey*, 2015, 34(3): 1-6.]
- [16] 伍立群, 顾世祥. 滇中水资源研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2005. [Wu L Q, Gu S X. Water Resources Research in Central Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2005.]
- [17] 中华人民共和国国土资源部. 中华人民共和国土地管理行业标准—县级土地利用总体规划编制规程[EB/OL]. (2010-06-27)[2018-11-12]. <https://wenku.baidu.com/view/97ba9664caaedd3383c4d347.html>. [Land and Resources Ministry of the People's Republic of China. Industrial Standards for Land Administration of the People's Republic of China: Regulations for the Compilation of General Plans for Land Use at the County Level[EB/OL]. (2010-

06-27)[2018-11-12]. <https://wenku.baidu.com/view/97ba9664caaed3383c4d347.html>.]

[18] 杨树华, 贺彬. 滇池流域的景观格局与面源污染控制[M]. 昆明:

云南科技出版社, 1998. [Yang S H, He B. Landscape Pattern and Non-point Source Pollution control in Dianchi Watershed[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1998.]

Location-weighted landscape index of non-point source pollution in Songhuaba Reservoir watershed

YUAN Ruijia

(Institute of Land & Resources and Sustainable Development, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China)

Abstract: To ensure the drinking water safety of Songhuaba Reservoir and to promote the prevention and control of water pollution in Dianchi watershed, this study took the non-point source pollution as the research object. Through analyzing the contribution of the different landscape in the formation of non-point source pollution in the watershed, the weights of each ‘source’ and ‘sink’ landscape were characterized by expert evaluation method. The relationship between landscape pattern and non-point source pollution was identified quantitatively from the whole watershed and the three spatial factors levels (slope degree, relative elevation, and distance) by the location-weighted landscape index. The results showed that: (1) All of the location-weighted landscape indexes are less than 0.50, demonstrating that the watershed is the ‘pollution-interception’ landscape pattern in the current, no matter from the whole watershed or from the spatial factor levels. It means that there is few non-point source pollution out from the watershed outlet now, in theory. (2) The result of $LWLI_{\text{slope degree}} > LWLI_{\text{relative elevation}} > LWLI_{\text{distance}}$ indicates that in this watershed, focusing on the protection of the ‘sink’ landscape on the high-altitude and steep slope zone could not only prevent the formation of new “pollution contribution” landscape pattern, but also could strengthen the existing landscape pattern of ‘pollution-interception’ in isolation circle. It could effectively block the outflow of soil and nutrients losing by the dry land. The dry land is the largest contributor to non-point source pollution load, is also the ‘source’ landscape with the largest area, and is located in the middle-high elevation and sloping fields in Songhuaba Reservoir watershed.

Key words: non-point source pollution; ‘source’ or ‘sink’ landscape pattern; LWLI(location-weighted landscape index); Lorenz Curve theory; Songhuaba Reservoir watershed