

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

岳 隽^{1,2}, 王仰麟^{2,*}, 李贵才¹, 吴健生^{1,2}, 谢苗苗^{1,2}

(1. 北京大学深圳研究生院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055; 2. 北京大学环境学院, 北京 100871)

摘要: 由于景观格局对水体质量的影响是依赖于研究尺度、并且随着时间尺度和空间尺度的变化而变化的, 因此探讨不同尺度上景观格局变化对水质的影响程度具有重要的研究价值。从深圳市水库流域水环境保护的需求出发, 选择西丽水库及其汇水子流域为研究对象, 以陈利顶等提出的景观空间负荷对比指数分析方法为基础, 区分高度、坡度和距离 3 个空间要素计算了分区和累积景观空间负荷对比指数, 继而利用该指数对比分析了不同时空尺度上“源”“汇”景观空间分异特征变化对水质的影响程度。研究结果表明, 不同尺度上的景观空间分异特征可以显著影响“源”“汇”景观在非点源污染输出和削减方面贡献程度的对比关系, 从而影响水体质量。由于不同尺度上景观空间分异特征的复杂性以及“源”“汇”景观在数量和类型方面差异的显著性, 景观空间负荷对比指数的对比关系并不能良好地反映不同空间尺度上景观空间分异特征对水质影响的差异状况, 因此必须针对不同的研究尺度有选择的应用该方法来探讨景观空间分异特征对水质的影响程度。

关键词: 尺度; 景观空间负荷对比指数; “源”“汇”景观; 景观空间分异; 西丽水库流域; 深圳市

文章编号: 1000-0933(2007)12-5271-11 中图分类号: Q149; X171 文献标识码: A

The influence of landscape spatial difference on water quality at differing scales: A case study of Xili reservoir watershed in Shenzhen city

YUE Jun^{1,2}, WANG Yang-Lin^{2,*}, LI Gui-Cai¹, WU Jian-Sheng^{1,2}, XIE Miao-Miao^{1,2}

1 The key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

2 College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5271 ~ 5282.

Abstract: The influence of landscape pattern on water quality will change depending upon scale, so it is meaningful to probe how changes in landscape pattern influence water quality at differing spatial-temporal scales. For water-environment protection of reservoir watersheds in Shenzhen city, this paper took Xili reservoir watershed and its sub-watersheds as research areas. This paper studied the influence of landscape spatial differences on water quality at differing temporal and spatial scales. At the temporal scale, this paper chose water quality monitoring data at the Xili reservoir outlet in 2000 and 2001, which was more heavily influenced by non-point pollution than point pollution. Spatially, due to the limits of data, this paper divided data into two spatial scales: the Xili reservoir watershed and its sub-watersheds. The Location-weighted Landscape Contrast Index (LCI) was developed and applied by Prof. Chen Li-Ding. It is used to analyze the relative influence of landscape spatial elements upon water quality. This paper first suggested some improvements to the LCI and then used those improvements to calculate elevation, slope and distance LCI with divisional or cumulative characteristics at the Xili

基金项目: 国家重点基金资助项目(40635028); 国家自然科学基金资助项目(40471002)

收稿日期: 2006-09-26; 修订日期: 2007-03-28

作者简介: 岳隽(1977~), 女, 甘肃兰州人, 博士, 主要从事景观生态学研究. E-mail: yuejun163@163.com

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

Foundation item: The project was financially supported by National Key Project Foundation of China (No. 40635028); National Natural Science Foundation of China (No. 40471002)

Received date: 2006-09-26; **Accepted date:** 2007-03-28

Biography: YUE Jun, Ph. D, mainly engaged in landscape ecology. E-mail: yuejun163@163.com

reservoir watershed and its sub-watersheds. Then we used this index to analyze the influence of 'Source' and 'ink' landscape spatial difference changes upon water quality at differing temporal-spatial scales. The results show that LCI can clarify the differing roles of 'Source' and 'Sink' landscape in the non-point pollution process. We can use this method to analyze how landscape spatial differences influence water quality. Moreover, LCI reveals that three main spatial elements — elevation, slope and distance — limit human activities upon landforms. So we should exploit the ability of natural landforms to intercept and decrease non-point pollution. However, LCI also has some shortcomings in practical usage. It is influenced by the complexity of the landscape spatial difference and dramatically influenced by differences in quantity and type of 'Source' and 'Sink' landscapes. It would therefore not be suitable for analysis at differing spatial scales for contrasting scale effects. So we should use the LCI method at appropriate scales, which will help the realization of research aims.

Key Words: scale; location-weighted landscape contrast index (LCI); 'Source' and 'Sink' landscape; landscape spatial difference; Xili reservoir watershed; Shenzhen city

景观生态学研究发展至今,已经从早期的以格局和功能分析为主,逐步发展到现阶段的对过程和相互作用程度的深入分析。景观格局及其变化的生态环境效应作为分析相互作用机制的切合命题逐渐成为景观生态研究的热点问题,其中景观格局变化对水体质量影响的研究已经成为水土资源协调利用所必须关注的对象。

在当前的景观格局变化对水质影响的研究中,一方面通过应用不同的数理统计方法来研究景观格局变化与水质变化之间的一致性和耦合度;另一方面利用一定的数学模型进行模拟预测分析。目前,用到的统计分析方法主要包括相关分析、变率分析、方差分析、多元逐步回归分析等等,主要侧重对流域尺度上斑块面积、斑块优势度、景观分离度以及景观多样性等指标与水质指标进行相关分析研究^[1~3]。而应用于这项研究的模型多是在模拟一定流域不同景观格局多年降水径流关系并定量评估景观格局变化对流域水量平衡影响的基础上,结合一定的水质模拟模型分析水体质量的变化特征。这些模型如 HSPF、SWIM、SWMM、SWAT 和 L-THIA 等近年来在国内得到了较广泛的应用^[4~8]。无论利用什么方法来研究景观格局变化与水质变化之间的关系,都必须关注到景观格局对水体质量的影响是依赖于研究尺度并且随着时间尺度和空间尺度的变化而变化的^[9,10]。正是由于流域内不同尺度上存在的复杂补偿效应,使得景观格局变化在某些程度上对水环境影响的效应非常微弱^[11],所以尺度问题逐渐成为景观格局变化对水质影响研究的重要方面。从时间尺度来看,目前主要根据降雨条件,区分不同水期开展研究^[3,12,13]。从空间尺度来看,一方面注重不同水平尺度上、具有不同特征的景观格局变化对水质影响的研究,如区分城市地域和农业地域^[14]以及区分流域和河岸带等研究^[15~17];另一方面,结合景观生态调控对景观单元垂直方向上匹配特征的研究需求^[18~20],重点分析垂直尺度上景观空间分异特征对水土流失及水质变化的影响,如傅伯杰等^[21]研究了黄土坡地从高到低不同景观结构对土壤中养分和水分的影响作用。这些研究为合理调控景观格局以降低非点源污染提供了重要的支持。

目前,深圳的发展受到“四个难以为继”即土地(空间)、能源(重点是水资源)、劳动力投入和环境容量的制约,而水库流域更是体现这“四个难以为继”的典型地区。随着地方经济的发展,流域内城市开发建设等引发的非点源污染问题对水库水质的威胁较大。特别地,由于深圳属亚热带海洋性季风气候区,雨量充沛、降雨历时短、降雨强度大、侵蚀力强,这些降雨条件使得地表污染物极易经径流冲刷进入水体,引发非点源污染。因此结合深圳市水库流域的地形特征,探讨景观空间分异特征对水体质量的影响程度,这对流域内水土资源的协调利用和协同保护具有重要的指导意义。

1 研究区域及数据获取

1.1 研究区域

本次研究选择深圳市西丽水库流域作为研究对象。西丽水库坝址以上集雨面积为 29km²,其主要汇水子流域有白芒子流域(BM)、麻磡子流域(MK)、王京坑子流域(WJK)和大磡子流域(DK)(图1)。

接彩图 1

研究中为了突出表现不同景观在污染物输出和削减方面的“源”“汇”特征,将研究区域的基本景观进行了分类合并。在“源”景观中,主要包括农业“源”景观和城市“源”景观,它们在非点源污染的形成过程中具有污染物输出的特征。由于农田和园地这类农用地因施肥等原因,造成土壤中氮、磷等营养物质含量较高,经降雨径流冲刷后容易导致水体的富营养化,因此农田和园地在非点源污染输出过程中具有“源”的特征;而城镇地区往往由于人类活动的聚集会产生大量的污染物,这样城镇建设用地也是一种典型的“源”景观。而由于城镇地区的未利用地大多受到人类的干扰,往往也逐渐成为具有非点源污染输出特征的斑块类型。与“源”景观相比,“汇”景观具有污染物削减的功能。在“汇”景观中主要指林地这类植被覆盖较好、同时污染物输出较低的斑块类型。很多试验研究都表明在森林地以及草甸植被和土壤系统的作用下,可以减少降雨径流对土壤的侵蚀程度以及降低径流中固体污染物的输出,从而净化水质^[22,23]。

2.2 研究尺度

研究尺度在不同学科领域中都是一个首先需要界定的问题,但是把尺度提升到研究的重要地位却是景观生态学学科发展的重要贡献。因为尺度的差异以及由此而产生的影响,使得不同尺度上景观组合方式产生差别,因而使景观格局与生态过程之间的关联关系存在差异。本次研究分别针对时空尺度上景观空间分异特征变化对水质的影响进行对比分析。

在时间尺度选择方面,主要考虑的是水体遭受非点源污染影响的程度如何。这是因为,在城市地区地表水体不仅参与自然循环、而且参与人工循环,这样进入地表水体的污染物随时间和空间发生着复杂的变化,水体遭受污染的程度明显提高。由于影响地表水体质量因素的多样性和复杂性,使得对水质变化原因的探究很难全尽,也很难将景观空间分异特征的变化以及由此而产生的水质变化对应起来。为了避免陷入水质变化影响因素分析的复杂过程,本次研究中选择水体遭受非点源污染影响程度比较显著的数据系列进行分析。在空间尺度选择方面,主要考虑的是水质监测数据与相应流域的匹配关系。目前非点源污染监测数据获取的主要方式是对选定监测点的河流水质数据进行降雨日和非雨日的同步监测,从而分析非点源污染负荷量。通常为了获取较为准确的监测数据,监测范围通常相对较小,对于一个较大的流域而言,很难获取这样的数据。基于以上的考虑,研究中区分西丽水库流域及其子流域两个空间尺度进行研究,并分别选择西丽水库流域 2000 年和 2001 年水库出水口的水质监测指标数值及其子流域 2004 年 7 月到 2005 年 6 月的降雨径流监测数据进行分析。

2.3 景观空间分异特征

研究中选择相对高度、坡度和相对距离 3 个指标来分析研究区域的景观空间分异特征。基于研究区域 2003 年数字高程模型(DEM)数据对高程、坡度和距离要素均进行了分级处理,以考虑不同分区范围内景观格局的空间分异特征。将高度以 40m 为间隔分成了 4 个区间,将坡度以 5°为间隔分成了 5 个区间,应用地理信息系统的缓冲区分析方法以 200m 和 500m 为间隔分别提取了与水库水面和河流水质监测点不同距离的景观斑块面积。由此,分别确定了研究区域在相对高度、坡度和相对距离 3 个空间要素方面的景观空间分异特征。

3 研究方法

3.1 景观空间负荷对比指数的引入

陈利顶、傅伯杰、张淑荣等对异质景观中非点源污染的动态变化进行了深入研究,通过河北省遵化地区于桥水库典型流域的案例研究,总结出基于“源”“汇”景观的空间负荷对比指数计算方法^[3,24]。该方法可以很好地用于分析景观空间要素对水环境的相对影响程度,从而确定景观空间调控的合理方向。景观空间负荷对比指数的核心思想就是利用不同景观要素在非点源污染产生和迁移过程中所起的不同作用来判断不同景观对非点源污染影响的对比程度。该指数的具体计算过程是:首先,区分研究区域的“源”“汇”景观,根据不同景观在污染物输出方面的相对大小来确定景观类型;其次,确定影响地表水环境质量的景观空间要素;最后,对比分析“源”“汇”景观对非点源污染输出和削减的相对贡献程度,也就是通过计算“源”“汇”景观累积面积的比值来分析这些空间要素对水体质量的影响程度。

由于景观要素的相对高度、坡度以及与地表水体的相对距离这三类空间分布特征对非点源污染的形成和发展具有重要的影响作用,因此需要区分相对高度、相对距离和坡度这三类景观空间负荷对比指数来分析不同空间特征对非点源污染的影响程度。一般认为,“源”景观相对于水体的距离越近,那么它可能对水体污染的贡献越大,反之它的贡献越小;“源”景观相对于水体的高度越小,它对水体污染的贡献越大,相反对水体的贡献越小。然而对于坡度这个要素来说,“源”景观分布地区的坡度越小,非点源污染物发生流失和迁移的危险性越小,那么它对水体污染的贡献相对较小;反之,如果“源”景观分布地区的坡度较大,那么在降雨径流冲刷作用下产生非点源污染的程度增加,对水体污染的贡献则越大。和“源”景观相对比而言,如果“汇”景观分布的范围距离水体较近、相对高度较小而坡度较大,反而会对水体质量的保护起到较好的作用。

3.2 景观空间负荷对比指数的应用

为了更好地利用景观空间负荷对比指数来分析研究区域不同尺度上景观空间分异特征对水质的影响程度,本次研究中在以下几个方面进行了调整。

(1)“源”“汇”景观累积面积百分比曲线(也就是洛伦兹曲线)与坐标轴所组成的不规则三边形面积的求解比较麻烦,在应用中存在一定的困难。本次研究中将高度、坡度和距离要素进行了分级处理,利用等间距范围内不同斑块类型的面积占景观总面积的累积百分比之和来代替不规则三边形的面积,从而求出一定范围内累积条件下的景观空间负荷对比指数。此外,为了更好地对不同空间要素分区范围内“源”“汇”景观的相对作用进行分析,则通过计算不同分区内“源”“汇”景观面积百分比的比例关系来衡量该区域内“源”“汇”景观的相对贡献程度。

(2)景观空间负荷对比指数在计算不同景观类型与水体的距离时是以地表水体采样监控点为中心的,这对于一条河流或是渠道来讲是比较合乎实际情况的。但是对于水库而言,水面面积较大、分布范围较广,虽然监测点一般设在水库出水口处,但是只要与水库水面线距离较近,其造成的威胁就越大,当然对于水库出水口水质状况的影响就越大。因此,在计算西丽水库流域相对距离景观空间负荷对比指数时,以水库水面线向外进行缓冲区分析;而在西丽水库子流域相对距离景观空间负荷对比指数的计算中,仍以与地表水体监测点的距离进行分析。

(3)陈利顶等选择了以农业活动为主的流域进行景观空间负荷对比指数的研究,因此对于“源”景观的权重可以根据以农田为参照景观的单位面积化肥使用量的比例关系来确定。本次研究的区域为城市化地区的水库流域,既存在耕地和园地这样的农业“源”景观,同时也存在城镇居住、工业和交通用地这样的城市“源”景观。而这两种“源”景观在污染物输出方面具有显著的差异。由于化学需氧量是一个衡量水质污染的综合指标,它可以表征水体中有机污染物的相对含量。因此,本次研究中基于西丽水库流域降雨径流水质的实测数据,将不同类型“源”景观的化学需氧量输出浓度进行对比分析,确定了研究区域“源”景观在污染物输出方面的权重关系。

根据以上分析,确定了本次研究中应用的景观空间负荷对比指数具体的计算公式如下:

$$LCI_R = \log\left(\sum_{i=1}^m W_i \times P_{ci} / \sum_{j=1}^n W_j \times P_{cj}\right) \quad (1)$$

式中, LCI_R 为分区景观空间负荷对比指数,包括相对高度(LCI_{RE})、坡度(LCI_{RS})和相对距离(LCI_{RD})三类指数; m 和 n 分别表示不同类型的“源”“汇”景观的数量; W_i 和 W_j 分别为不同“源”“汇”景观类型在非点源污染物形成和削减方面所起作用的相对权重; P_{ci} 和 P_{cj} 分别为“源”“汇”景观占空间要素分析区间的百分比。在相同的高程带、坡度带以及缓冲区范围内,相对高度、坡度和相对距离景观空间负荷对比指数越大,则说明在该范围内“源”景观的贡献越大,从而导致非点源污染产生的威胁更大。

$$LCI_C = \log\left(\sum_{i=1}^m S_i \times W_i \times P_{tci} / \sum_{j=1}^n S_j \times W_j \times P_{tcj}\right) \quad (2)$$

式中, LCI_C 为流域尺度上一定区间范围内累积景观空间负荷对比指数,包括相对高度(LCI_{CE})、坡度(LCI_{CS})和相对距离(LCI_{CD})3类指数; S_i 和 S_j 分别为“源”“汇”景观在区间范围内的面积累积百分比之和; P_{tci}

和 P_{tj} 分别表示第 i 种“源”景观和第 j 种“汇”景观在整个区间内所占的面积百分比,其他指标含义同式 1。

当 LCI 等于 0 时,表示“源”“汇”景观均匀分布; LCI 大于 0 时,表示“源”景观的贡献大于“汇”景观; LCI 小于 0 时,表示“汇”景观的贡献大于“源”景观。需要强调的是,“源”“汇”景观在距离要素和高度要素增加方向上对污染物输出的影响程度与坡度要素增加方向上的影响程度正好相反。具体来讲,就是在相对高度较低或相对距离较近的地方,如果相对高度和相对距离景观空间负荷对比指数越大,表明流域内非点源污染输出对水体的影响越大;而由于相对高度或相对距离较小的地方其坡度一般也相对较小,所以尽管坡度景观空间负荷对比指数较大,其产生污染物的程度相对还是比较轻的。

4 研究结果

4.1 西丽水库子流域尺度

图 2 为西丽水库子流域范围内分区景观空间负荷对比指数以及累积景观空间负荷对比指数的变化趋势图。

图 2(1)为西丽水库汇水子流域内相对高度景观空间负荷对比指数。由于这些子流域均位于西丽水库流域的上游,在较低的高程带内,大多子流域内无林地这样的“汇”景观存在,因而未计算“源”“汇”景观贡献程度的对比值。随着高程的不断增加,各个子流域的相对高度景观空间负荷对比指数都在不断降低,这说明在高度逐渐增加的方向上“源”景观的贡献逐渐小于“汇”景观的贡献。区分不同高程带来看,在 40~80m 高程带内大礪子流域具有较大的相对高度景观空间负荷对比指数,其次是麻礪子流域;在 80~120m 高程带内,王京坑子流域具有较大的相对高度景观空间负荷对比指数。不同子流域在不同高程带内景观空间负荷对比指数的大小序位变化,表明“汇”景观在不同高程空间范围内的数量差异会显著影响到“源”“汇”景观的对比关系。

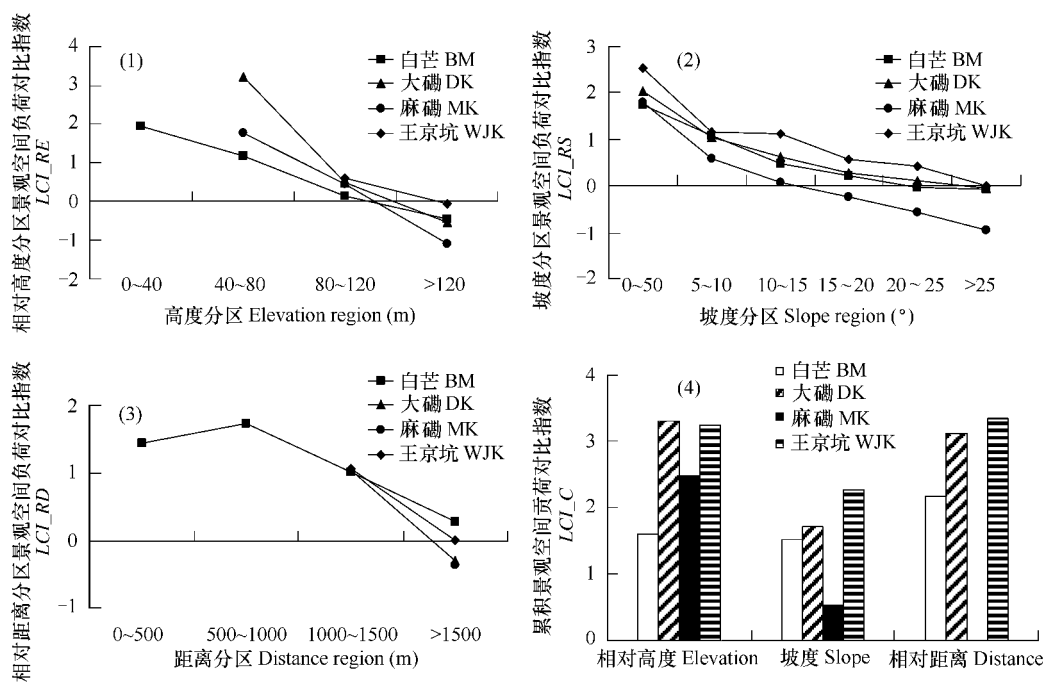


图 2 西丽水库子流域景观空间负荷对比指数变化趋势图

Fig. 2 Changing trends of LCI at Xili reservoir subwatersheds

图 2(2)为坡度景观空间负荷对比指数。从图中可以看出,不同子流域范围内,随着坡度的增加,坡度景观空间负荷对比指数均出现降低的趋势,也就是说在不同坡度带内“汇”景观的贡献逐渐大于“源”景观的贡献。在不同坡度带内,王京坑子流域的坡度景观空间负荷对比指数相对最大,说明在不同坡度带内王京坑子

流域的“源”景观相对于“汇”景观的贡献均较大。虽然不同子流域内在坡度 15° 以下几乎均为“源”景观的贡献大于“汇”景观的贡献,但是由于这些区域的坡度相对较低,因而对非点源污染输出的贡献相对比较小。

图 2(3)为相对距离景观空间负荷对比指数。与不同高程带景观空间负荷对比指数一样,由于某些缓冲区范围内缺少林地这样的“汇”景观,因而未计算相对距离景观空间负荷对比指数,在图中则以空缺表示。从不同距离景观空间负荷对比指数来看,随着缓冲区距离的增加,距离地表水体越远的地方,“汇”景观的贡献逐渐大于“源”景观的贡献;但是在距离水体较近的地方,“源”景观的贡献大于“汇”景观的贡献,使水体遭受污染的威胁程度依然较大。区分不同距离来看,在 $500 \sim 1000\text{m}$ 的缓冲区范围内,白芒子流域具有较大的相对距离景观空间负荷对比指数;而在 $1000 \sim 1500\text{m}$ 缓冲区范围内,麻磡具有较大的相对距离景观空间负荷对比指数。这同样表明,由于不同缓冲区范围内林地这样的“汇”景观存在与否以及数量的差异,使得不同子流域的不同缓冲区范围内相对距离景观空间负荷对比指数表现出明显差异。

总体上来看,西丽水库子流域景观空间负荷对比指数的大小特征与流域出口水体质量的污染特征具有较好的一致性。但是,由于不同子流域内“源”“汇”景观在高程、坡度以及距离分布方面的数量差异特征,特别是由于“源”景观的类型差异,使得景观空间负荷对比指数受到一定的影响。将以上不同子流域的景观空间负荷对比指数结合相应的水质指标来看,发现景观空间负荷对比指数明显受到了流域范围内“源”“汇”景观数量对比特征的影响。以王京坑子流域为例,从图 2(4)的累积景观空间负荷对比指数可以看出,该子流域的相对高度、相对距离景观空间负荷对比指数都处于较高的水平。

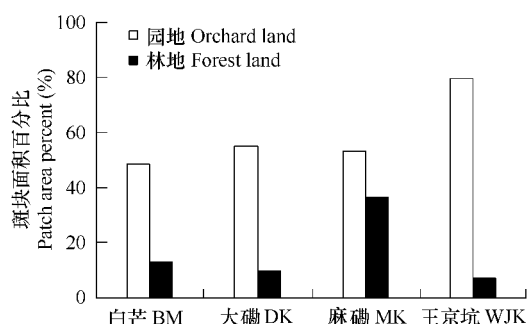


图3 西丽水库子流域斑块面积百分比变化趋势图

Fig. 3 Changing trends of patch area percentage at Xili reservoir subwatersheds

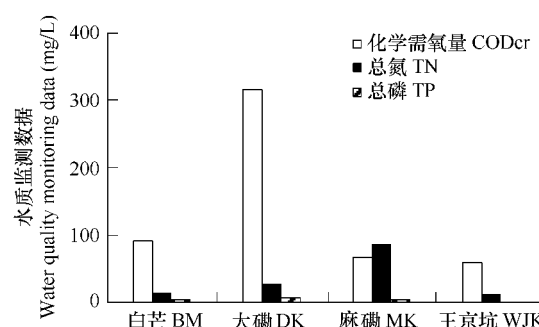


图4 西丽水库子流域水质指标变化趋势图

Fig. 4 Changing trends of water quality monitoring data at Xili reservoir subwatersheds

结合图 3 所示的西丽水库子流域主要用地斑块面积百分比变化趋势可以发现,王京坑子流域内园地这一“源”景观所占的面积百分比远远大于其他子流域内“源”景观所占的面积百分比数值;而同时流域内林地这一“汇”景观所占的面积百分比却远远小于园地斑块的面积百分比。由于园地和林地面积所占比例方面的悬殊差异,从而使得王京坑子流域的相对高度和相对距离景观空间负荷对比指数几乎均大于其他子流域。从理论上来讲,相对高度和相对距离景观空间负荷对比指数越大,则表明流域内污染物的输出量越大,那么水体受污染的情况应该比较严重。但是实际上,从图 4 所示的各子流域出口的水质监测指标变化趋势来看,王京坑子流域的水质状况在 4 个水质监测点中处于相对较好的水平。这表明,虽然王京坑子流域内园地这类“源”景观占据的数量较大,但是由于园地在非点源污染输出方面的贡献远远小于城镇建设用地的贡献程度,和其他子流域内城镇用地、工业用地和交通用地等建设用地“源”景观面积比例较大的情况相比,王京坑流域内产生污染物的程度应该相对比较小。这一结果表明,景观空间负荷对比指数明显受到了“源”“汇”景观的类型以及数量对比特征的影响。

4.2 西丽水库流域尺度

图 5 为西丽水库流域范围内 2000 年和 2001 年的分区景观空间负荷对比指数以及累积景观空间负荷对比指数的变化趋势图。

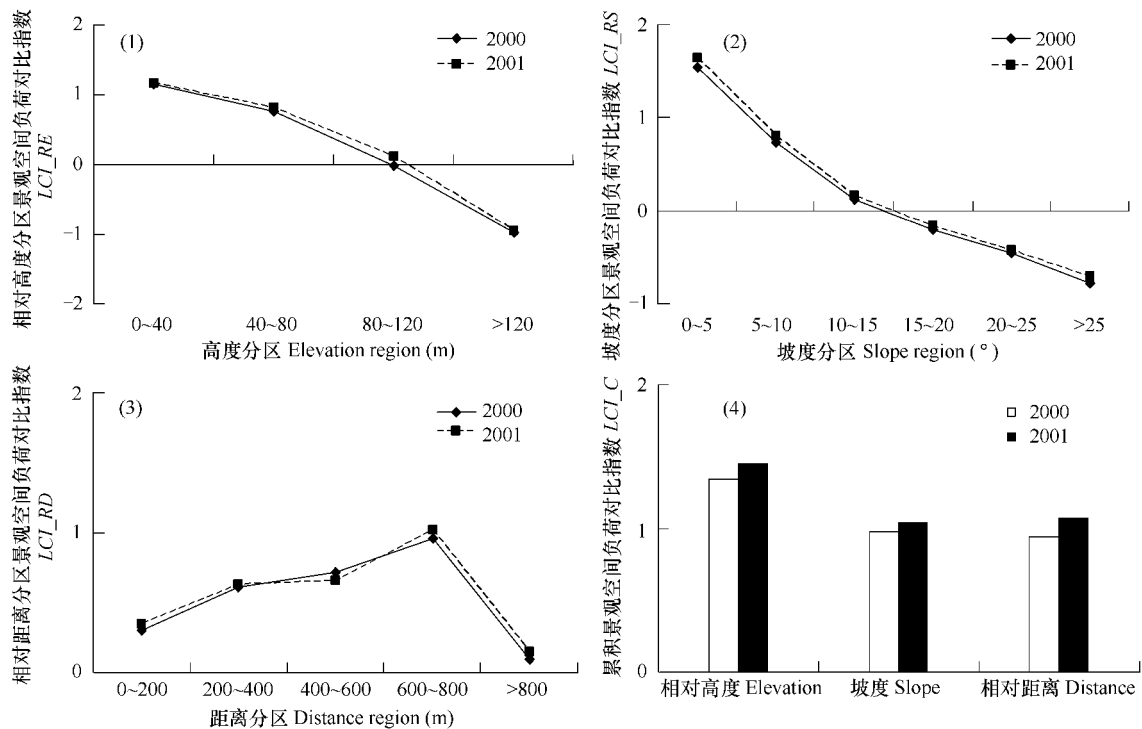


图5 西丽水库流域景观空间负荷对比指数变化趋势图

Fig. 5 Changing trends of LCI at Xili reservoir watershed

图5(1)为西丽水库流域相对高度景观空间负荷对比指数。从图中可以看出,在<80m的高程带内,“源”景观的贡献均大于“汇”景观的贡献。在>120m的高度范围内,“汇”景观的贡献均大于“源”景观的贡献,这表明随着高度的增加由于林地这一“汇”景观数量的不断增加,因而高度越高的区域内“汇”景观的贡献越来越大。从时间变化特征来看,从2000年到2001年,相对高度景观空间负荷对比指数呈增加趋势,而且在高程相对较低的区域内“源”景观的贡献越来越大,因而增加了水体遭受污染的威胁程度。这说明在高度这个空间要素方面,西丽水库流域在高度上的景观空间分异变化特征使得污染物输出向增加的方向发展。

图5(2)为坡度景观空间负荷对比指数。在坡度 15° 以下,“源”景观的贡献大于“汇”景观的贡献,但是从2000年到2001年,坡度景观空间负荷对比指数不断增加,这表明随着时间的推移,和“汇”景观相比,“源”景观的贡献越来越大。在坡度 15° 以上,坡度景观空间负荷对比指数的数值均小于0,因而“源”景观的贡献小于“汇”景观的贡献,但是从2000年到2001年,“汇”景观的贡献逐渐降低。从西丽水库坡度景观空间负荷对比指数的时间变化来看,在该流域尺度上“源”景观的贡献逐渐在增加。虽然“源”景观逐渐增加的区域多分布在坡度较小的区域,在坡度较大的范围内“汇”景观的贡献依然远远大于“源”景观的贡献,这样使得在坡度这一空间要素方面流域范围内的“源”“汇”景观的变化特征不会影响到“源”“汇”景观在非点源污染输出过程中的对比关系,但是从年际变化来看,西丽水库流域在坡度上的景观空间分异特征的变化不利于降低非点源污染负荷。

图5(3)为相对距离景观空间负荷对比指数。从2000年到2001年,流域内除400~600m缓冲区范围内相对距离景观空间负荷对比指数有所降低以外,其他范围内景观空间负荷对比指数均呈现增加的趋势,也就是说“源”景观相对于“汇”景观而言其贡献程度不断增加。这说明在距离这个空间要素方面,2001年“源”景观的贡献程度要大于2000年,这样水体遭受污染的程度不断加剧。

结合图5(4)西丽水库流域相对高度、坡度和相对距离的累积景观空间负荷对比指数来看,虽然由于流域内坡度较大的区域“汇”景观占据较大的优势而使得在坡度这个要素方面非点源污染产生的威胁较小,但是

从 2000 年到 2001 年,不同坡度带内“汇”景观的贡献程度都在降低,而“源”景观的贡献程度逐渐提高。而且从相对高度和相对距离累积景观空间负荷对比指数来看,西丽水库流域从 2000 年到 2001 年都表现出非点源污染输出程度逐渐加剧的态势。以上景观空间负荷对比指数所表现出的非点源污染输出加剧与西丽水库水质从 2000 年到 2001 年表现出的恶化趋势具有相一致的特征。

5 结论与讨论

研究中根据陈利顶等提出的景观空间负荷对比指数,结合研究区域的实际情况对其进行调整,从而计算并分析了西丽水库流域及其子流域内相对高度、坡度和相对距离景观空间负荷对比指数以及一定区间范围内的累积景观空间负荷对比指数的变化特征。由于景观空间负荷对比指数可以反映“源”“汇”景观在非点源污染输出和削减方面贡献程度的对比关系,所以可以很好地体现景观空间分异特征变化对水体质量的影响程度。

对西丽水库子流域景观空间负荷对比指数的研究主要是分析不同空间尺度上景观空间分异特征变化对水体质量的影响程度。结合各子流域水质特征对景观空间负荷对比指数进行分析,发现景观空间负荷对比指数较大的子流域,其水体质量并不一定很差。比如,王京坑子流域就具有较大的景观空间负荷对比指数,但是该子流域的水体质量是相对较好的。虽然王京坑子流域内城镇用地等“源”景观的数量较少,但是由于园地这类“源”景观与林地这类“汇”景观数量差距过于悬殊,使得“汇”景观的贡献和“源”景观的贡献相比之下显得非常微弱,这样景观空间负荷对比指数计算出来的数值相对就大。但是实际上,从不同类型“源”景观输出污染物的特征来看,园地和城镇用地相比而言对水体污染的影响程度要小的多。从这一点来看,以园地为优势斑块的王京坑子流域内污染物输出程度并不会很高。这说明,景观空间负荷对比指数明显受到了“源”“汇”景观相对数量大小关系的强烈影响,因而不能很好地反映出不同空间尺度上景观空间分异特征对水体质量的影响程度,可见必须针对不同的研究尺度有选择的应用景观空间负荷对比指数方法来探讨景观空间分异特征对水质的影响程度。

对西丽水库流域景观空间负荷对比指数的研究主要是分析不同时间尺度上景观空间分异特征变化对水体质量的影响程度。研究结果表明,从 2000 年到 2001 年,该流域的景观空间负荷对比指数几乎都表现出增加的趋势,也就是相对于“汇”景观而言,“源”景观的贡献逐渐在加强,因此对水环境的威胁程度也在不断增加,这与水库水体质量的降低表现出相同的趋势,可见在时间尺度方面景观空间负荷对比指数可以很好地反映景观空间分异特征变化对水体质量的影响程度。从三类景观空间负荷对比指数来看,因为受到高度、坡度和与水体距离这 3 个空间要素的限制,使景观空间负荷对比指数随着高度、坡度和距离增加方向上的变化表现出“汇”景观贡献逐渐增加的特征,但是在相对高度较小、相对距离较近的区域内依然以“源”景观占优为主要特征。从这一点来看,景观空间负荷对比指数可以很好地反映高度、坡度和距离这些空间要素对人类活动的限制作用,这提示我们在以后的流域景观格局优化研究中一定要注意高度、坡度和距离等空间要素对水质的影响程度,充分利用自然地形条件对非点源污染的截流或削减作用来合理规划流域景观要素。

References:

- [1] Aspinall R, Pearson D. Integrated geographical assessment of environmental condition in water catchments: Linking landscape ecology, environmental modeling and GIS. *Journal of Environmental Management*, 2000, 59: 299—319.
- [2] Li J R, Chen L D, Guo X D, *et al.* Effects of land use structure on non-point source pollution. *China Environmental Science*, 2000, 20(6): 506—510.
- [3] Chen L D, Fu B J, Zhang S R, *et al.* Comparative study on the dynamics of non-point pollution in a heterogeneous landscape. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 808—816.
- [4] Yang G L, Hao F H, Liu C M, *et al.* The study on baseflow estimation and assessment in SWAT - Luohe basin as an example. *Progress in Geography*, 2003, 22(5): 463—471.
- [5] Gao Q X, Li T. Review on nonpoint source runoff quality simulation models in foreign cities, *Safety and Environmental Engineering*, 2003, 10

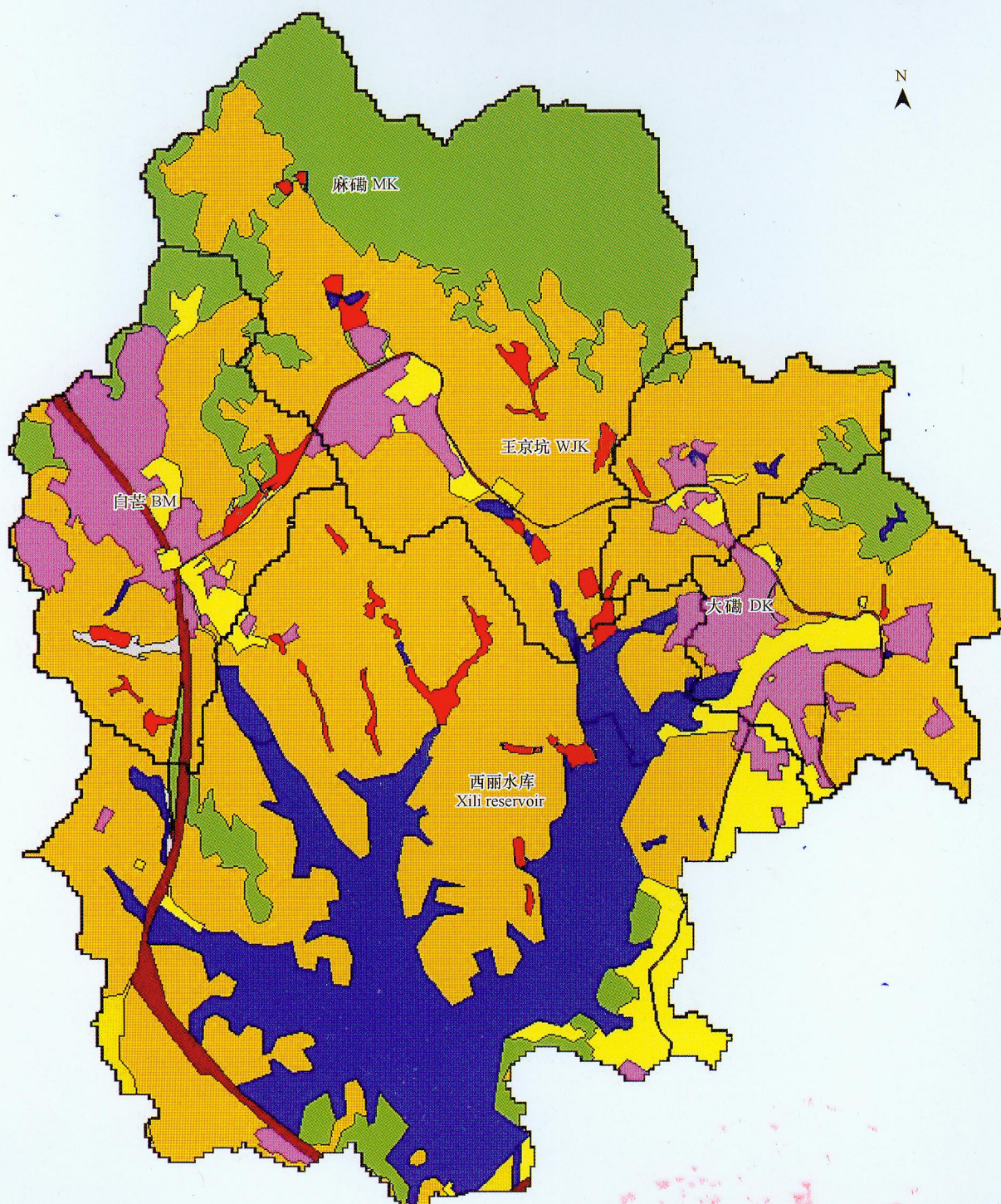
(4): 9—12.

- [6] Zhang L N, Li X B, Wang Z F, *et al.* Study and application of SWAT model in the Yunzhou reservoir basin. *Hydrology*, 2004, 24(3): 4—8.
- [7] Xing K X, Guo H C, Sun Y F, *et al.* Simulation of non-point source pollution in Lake Dian basin based on HSPF model. *China Environmental Science*, 2004, 24(2): 229—232.
- [8] Yang L, Ma K M, Guo Q H, *et al.* Impacts of the Urbanization on waters non-point source pollution. *Environmental Science*, 2004, 25(6): 32—39.
- [9] Allan J D, Erickson D L, Fay J. The influence of catchment land use on stream integrity across multiple spatial scales. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 149—161.
- [10] Townsend C R, Dolédec S, Norris R, *et al.* The influence of scale and geography on relationships between stream community composition and landscape variables: description and prediction. *Freshwater Biology*, 2003, 48: 768—785.
- [11] Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, *et al.* Hydrologic Response to Land Use Changes on the Catchment Scale. *Phys. Chem. Earth (B)*, 2001, 26: 577—582.
- [12] Johnson L B, Richards C, Host G E, *et al.* Landscape influences on water chemistry in Midwestern stream ecosystems. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 193—208.
- [13] Chen L D, Li J R, Guo X D, *et al.* Temporal and spatial characteristics of surface water quality in Jiyun River. *Environmental Science*, 2000, 21(6): 61—64.
- [14] Ferrier R C, Edwards A C, Hirst D, *et al.* Water quality of Scottish rivers: spatial and temporal trends. *The Science of the Total Environment*, 2001, 265: 327—342.
- [15] Sponseller R A, Benfield E F, Valett H M. Relationships between land use, spatial scale and stream macroinvertebrate communities. *Freshwater Biology*, 2001, 46: 1409—1424.
- [16] Buck O, Niyogi D K, Townsend C R. Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural catchments. *Environmental Pollution*, 2004, 130: 287—299.
- [17] Mou P P, Wang Q C, Hershey A E, *et al.* Land-use, stream order and stream water physical and chemical qualities. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1486—1492.
- [18] Zhang H Y, Wan J. A practical approach of ecological optimizing of mountain landscape based on GIS. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(4): 69—74.
- [19] Zhang H Y, Wang Y L. Ecological optimization of landscape in land resource exploitation: overview of the methods. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 2000, 7(suppl.): 112—120.
- [20] Li W F, Wang Y L, Jiang Y Y, *et al.* Spatial approaches to ecological regulation in urban areas: A case in Shenzhen. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1823—1831.
- [21] Fu B J, Chen L D, Ma K M. The effect of land use change on the regional environment in the Yangjuangou catchment in the Loess Plateau of China. *Acta Geography Sinica*, 1999, 54(3): 241—246.
- [22] Lei X Z, Chen X M, Zhao W Q. Study on the control capacity of forest system for non-point pollution. *Chongqing Environmental Science*, 2000, 22(2): 41—44.
- [23] Li W Y, Yu X X, Ma Q Y, *et al.* Analysis to influence of water conservation forest in Miyun reservoir on water quality. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(2): 80—83.
- [24] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2406—2413.

参考文献:

- [2] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响. *中国环境科学*, 2000, 20(6): 506—510.
- [3] 陈利顶, 傅伯杰, 张淑荣, 等. 异质景观中非点源污染动态变化比较研究. *生态学报*, 2002, 22(6): 808—816.
- [4] 杨桂莲, 郝芳华, 刘昌明, 等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价——以洛河流域为例. *地理科学进展*, 2003, 22(5): 463—471.

- [5] 高秋霞, 李田. 国外城市非点源径流水质模型简介. 安全与环境工程, 2003, 10(4): 9~12.
- [6] 张蕾娜, 李秀彬, 王兆锋, 等. 一种可用于表征土地利用变化水文效应的水文模型探讨——SWAT 模型在云州水库流域的应用研究. 水文, 2004, 24(3): 4~8.
- [7] 刑可霞, 郭怀成, 孙廷枫, 等. 基于 HSPF 模型的滇池流域非点源污染模拟. 中国环境科学, 2004, 24(2): 229~232.
- [8] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响. 环境科学, 2004, 25(6): 32~39.
- [13] 陈利顶, 李俊然, 郭旭东, 等. 蓟运河流域地表水质时空变化特征分析. 环境科学, 2000, 21(6): 61~64.
- [17] 牟溥, 王庆成, Hershey A E, 等. 土地利用、溪流级别与溪流河水理化性质的关系. 生态学报, 2004, 24(7): 1486~1492.
- [18] 张惠远, 万军. GIS 支持下的山地景观生态优化途径. 水土保持研究, 1999, 6(4): 69~74.
- [19] 张惠远, 王仰麟. 土地资源利用的景观生态优化方法. 地学前缘, 2000, 7(增刊): 112~120.
- [20] 李卫锋, 王仰麟, 蒋依依, 等. 城市地域生态调控的空间途径——以深圳市为例. 生态学报, 2003, 23(9): 1823~1831.
- [21] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例. 地理学报, 1999, 54(3): 241~246.
- [22] 雷孝章, 陈季明, 赵文谦. 森林对非点源污染的调控研究. 重庆环境科学, 2000, 22(2): 41~44.
- [23] 李文字, 余新晓, 马钦彦, 等. 密云水库水源涵养林对水质的影响. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 80~83.
- [24] 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. 生态学报, 2003, 23(11): 2406~2413.



图例 Legend

耕地 Arable land
园地 Orchard land
林地 Forest land

水域 Water
特殊用地 Special land
城镇用地 Urban land

工业用地 Industrial land
交通用地 Transport land
未利用地 Unused land

图1 西丽水库流域景观分类图
Fig.1 Landscape type map of Xili reservoir watershed