

深圳市西部库区景观格局与水质的关联特征^{*}

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, 广东深圳 518055 ²北京大学环境学院, 北京 100871)

摘要 利用灰色关联分析方法研究了深圳市西部水库流域景观格局指数与水质指标的关联关系,并探讨了“源”、“汇”景观格局对非点源污染的影响程度.结果表明:研究区“源”、“汇”景观的优势程度、聚集程度和破碎程度显著地影响流域内水体质量;2000—2001年,由于研究区“源”、“汇”景观格局的变化,使得整个流域内污染物输出程度不断加剧,污染物得以削减的程度不断降低,导致研究区水体质量恶化.结合研究区“源”、“汇”景观的空间分布特征来看,水库水体质量的变化与“汇”景观在流域下游的分布特征具有紧密关联,这说明“汇”景观格局对非点源污染的防治起着非常重要的作用.

关键词 景观格局 水质 灰色关联 源 汇 非点源污染

文章编号 1001-9332(2008)01-0203-05 **中图分类号** Q149; X171 **文献标识码** A

Relationships between landscape pattern and water quality at western reservoir area in Shenzhen City YUE Jun², WANG Yanglin¹, LI Guicai¹, WU Jiansheng², XIE Miaomiao² (¹Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, Guangdong, China; ²College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China). -Chin J Appl Ecol, 2008 19(1): 203-207.

Abstract In this paper, the relationships between landscape pattern and water quality at western reservoir area in Shenzhen City were studied with grey connection method, and the influences of ‘source’ and ‘sink’ landscape patterns on non-point pollution were probed. The results showed that the dominance, adjacency, and fragmentation of ‘source’ and ‘sink’ landscapes could markedly influence the water quality. From 2000 to 2001, due to the changes of the ‘source’ and ‘sink’ landscape patterns in research areas, the output of pollutants increased and the reduction of pollution decreased, resulting in the deterioration of water quality of three reservoirs. According to the spatial distribution of ‘source’ and ‘sink’ landscapes, it was found that the distribution of ‘sink’ landscapes at the middle-lower reaches of the watersheds had close relationships with the changes of reservoir water quality, suggesting that ‘sink’ landscape pattern was of significance in the management of non-point pollution.

Key words: landscape pattern, water quality, grey connection, source, sink, non-point pollution

景观的结构、功能和过程总是与一定的空间范围相联系.在流域的空间尺度上,由于水流在重力作用下的汇集作用使不同景观要素之间的物质流和能量流的联系更为紧密,并使得流域下垫面因素(如流域的地形、土壤和植被等)对流域的水文特征产生显著影响^[1-2].土地利用方式和覆被类型的变化可显著影响水量和水质^[3-9],土地利用对水质影响的主要途径是非点源污染^[7],而景观格局的改变对非点源污染的影响十分显著^[8-10].因此,利用景观

生态学的基本原理,研究流域尺度上不同景观要素对水体质量的影响程度,继而从景观格局入手进行非点源污染的防治是一种非常有效的措施.不同地区供水水库的水体污染问题中约60%以上来自流域范围内的非点源污染,探讨库区景观格局与水体质量之间的关联机制,是解决非点源污染和改善降雨径流水质的非常合适的切入角度,也是保障水库流域供水安全、满足水库长远发展的迫切需求.

目前,深圳的发展正面临土地(空间)、能源(重点是水资源)、劳动力投入和环境容量这4个“难以继”的制约.作为全国7个严重缺水的城市之一,深圳市如何保护好境内水资源,特别是降低城市开

*国家自然科学基金重大项目(40635028)和国家自然科学基金资助项目(40471002).

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

2007-01-26收稿, 2007-10-30接受.

发建设等引发的非点源污染问题, 显得尤为迫切. 本文以深圳市西部库区作为研究对象, 从如何调控景观格局以降低非点源污染的角度, 研究了景观格局指数与水库水质指标的关联关系, 旨在为防治非点源污染提供理论支持.

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

本研究区域为深圳市西部的西丽 (XL) 水库、石岩 (SY) 水库和铁岗 (TG) 水库及其 137 km² 的集雨范围 (22° 35'—22° 42' N, 113° 51'—113° 57' E) (图 1). 研究区属南亚热带海洋性季风气候, 日照强, 雨量充沛, 干湿季分明. 全区地貌以丘陵为主, 其次为台地和平原. 由于地形的特点, 库区内河流均较短小, 属雨源型河流. 年均地表径流深 871 mm; 年均径流量 11 932. 7 万 m³.

1.2 研究方法

1.2.1 景观分类 为了探讨不同景观在污染物输出和削减方面的“源”、“汇”特征^[11], 将研究区的基本景观进行分类合并, 得到了“源”、“汇”两类景观.

“源”景观主要包括农业“源”景观 (如耕地和园地) 以及城镇“源”景观 (如城镇居住用地、工业用地和交通用地等), 它们在非点源污染形成过程中具有污染物输出的特征. 其中耕地和园地因施肥等原因, 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; 城镇地区由于人类活动产生大量污染物, 其未利用地也大多受到人类干扰, 逐渐成为具有非点源污染输出特征的斑块类型.

“汇”景观主要包括林地和牧草地等植被覆盖较好、污染物输出较低的斑块类型. 与“源”景观相

比, “汇”景观具有削减污染物的功能, 可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, 净化水质^[12-14].

另外, 水体具有养分截流的功能^[15], 但由于研究区的水域主要以水库水体为主, 从理论上讲, 水库特别是供水水库的水体不允许接纳任何污染物, 因此认为研究区水域不具有接纳污染物的能力, 故不参加“源”、“汇”景观的格局分析.

1.2.2 灰色关联理论 水体质量的变化是多因素综合作用的结果, 这些因素对水质变化的影响程度会随着时空尺度的变化表现出显著差异, 为判断景观格局变化的作用带来了一定的困难, 也使得仅依靠传统的相关分析方法很难说明两者之间的关系强度. 为了克服这种缺陷, 本研究采用灰色关联技术分析景观格局指数与水质指标之间的灰色关联度, 用以确定景观格局对水质的影响程度.

灰色关联理论是灰色系统中理论最成熟、应用最广泛、最具有活力的部分^[16]. 灰色关联分析的重点是确定不同子因素与母因素的关联序关系, 突出子因素对母因素影响的重要方面. 其分析的主要步骤包括:

1) 设定参考序列和比较序列

$$Y_i = (Y_i(1), Y_i(2), \dots, Y_i(k))$$

$$i = 1, 2, \dots, n \tag{1}$$

$$X_j = (X_j(1), X_j(2), \dots, X_j(k))$$

$$j = 1, 2, \dots, m \tag{2}$$

式中: 参考序列 Y_i 为需要作比较的母因素, 本研究中为水质指标; 比较序列 X_j 为与母因素进行关联程度比较的子因素, 本研究中为景观格局指数; n 和 m 分别为参考序列和比较序列中因素的个数; $k = 1, 2, \dots$, 为参与灰色关联度计算的数据序列个数.

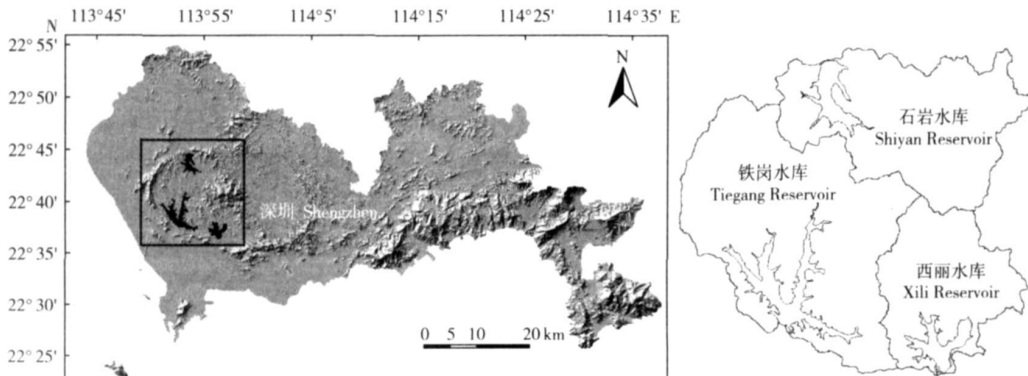


图 1 深圳西部库区位置
Fig 1 Location of western reservoir area in Shenzhen City

2) 计算关联系数

$$\xi_{ij}(k) = \frac{M_j \min_i \Delta_{ij}(k) + \rho M_j \max_i \Delta_{ij}(k)}{\Delta_{ij}(k) + \rho M_j \max_i \Delta_{ij}(k)} \quad (3)$$

式中: $\xi_{ij}(k)$ 为比较序列 $X_j(k)$ 对参考序列 $Y_i(k)$ 的关联系数; $\Delta_{ij}(k) = |Y_i(k) - X_j(k)|$ 为参考序列与比较序列在第 k 个序列的绝对差; $M_j \min_i \Delta_{ij}(k)$ 为两级最小差; $M_j \max_i \Delta_{ij}(k)$ 为两级最大差; ρ 为灰度系数, 也称分辨系数, 为介于 $[0, 1]$ 区间上的数值, 一般取 $\rho = 0.5$ 。当 $\Delta_{ij}(k)$ 取两级最小值时, $\xi_{ij}(k)$ 取最大值; 取两级最大值时, $\xi_{ij}(k)$ 取最小值。

3) 计算灰色关联度

综合各点 ($k = 1, 2, \dots, n$) 的关联系数, 即可得到比较序列与参考序列的关联度 γ_{ij}

$$\gamma_{ij} = \sum_{k=1}^n W_j(k) \times \xi_{ij}(k) \quad (4)$$

式中: $W_j(k)$ 为比较序列中不同序列的因子权重, 一般情况下取各个序列的权重相同。 γ_{ij} 越大, 说明 X_j 与 Y_i 的关系越密切, 或者说影响越大。由于参考序列和比较序列可能存在量纲和数量级的差异, 因此在进行关联度计算之前, 需要对原始数据进行初值变换或均值变换^[17]。

由于对水质变化原因的探讨构成了一个灰色系统问题, 因此借助灰色系统方法可较好地提取影响水质变化的主要因素。

1.2.3 数据选择 1) 水质数据。通过对《广东省深圳市环境质量公报》^[18] 中 1991—2004 年深圳市西部水库出水口水质监测指标年均值的时间序列分析, 发现该区域的水质明显受到了点源污染截排率和外来引水量的影响, 只有 2000 和 2001 年水库水体质量的变化受点源污染和外来引水量影响较小。尽管灰色关联分析法对样本的数量和分布特征要求较低, 但为了降低上述干扰因素对研究结果的影响程度, 仍需对研究的数据系列进行适当筛选。为降低点源污染、外来引水等干扰因素对水质变化的影响程度, 选择 2000 和 2001 年 3 个水库出水口水质监测数据中的 3 个水质污染指标——高锰酸盐指数 (COD_{Mn})、硝酸盐氮 (Nitrate-N) 和总磷 (TP) 进行分析。

2) 景观格局。通过分析与水质数据相匹配的深圳市 2000 和 2001 年的土地利用变更调查数据, 区分“源”、“汇”两种景观类型, 计算了不同年份的景观格局指数, 用于分析研究区景观格局的变化特征。

根据景观核心指数集合^[19-20] 选择斑块密度 (Patch density PD)、斑块平均面积 (Patch mean area PMA)、斑块总面积 (total class area CA)、斑块优势度 (Percentage of landscape PLAND)、斑块集聚度 (Percentage of like adjacencies PLADJ) 和斑块连通度 (Patch cohesion index PCI) 6 个指标进行分析。景观水平上各类斑块综合作用的复杂程度, 使得景观水平上格局指数与水质指标之间的关系很难明确说明, 因此本研究仅计算了斑块水平上景观格局指数与水质指标的灰色关联度。

2 结果与分析

2.1 景观格局与水体质量的灰色关联度

从表 1 可以看出, 与高锰酸盐指数、硝酸盐氮和总磷的灰色关联度最大的均为“汇”景观的格局指数。表明在研究时段内深圳市西部库区的水质明显受到了该区内“汇”景观格局的影响。由于研究区具有明显的城市化特征, 可能由于景观要素之间相互作用的程度比较复杂或人类对水文循环的影响更加剧烈, 在某种程度上降低了城镇建设用地等“源”景观对水质的影响程度, 反而使得“汇”景观格局对水质的影响作用突显出来。灰色关联分析结果表明, 与水体质量关联程度较大的景观格局指标相对集中在斑块优势度、斑块集聚度和斑块密度这 3 个方面。

2.2 景观格局指数与水体质量的关系

根据以上分析的结果, 选择斑块优势度、斑块集

表 1 深圳市西部库区“源”、“汇”景观格局指数与水质污染指标的灰色关联度

Tab 1 Grey connection between 'source' and 'sink' landscape indices and water quality indices at western reservoir area in Shenzhen City

景观类型 Landscape type	格局指数 Landscape index	水质指标 Water quality index		
		高锰酸盐指数 COD _{Mn}	硝酸盐氮 Nitrate-N	总磷 TP
“源”景观 'Source' landscape	斑块总面积 CA	0.71	0.51	0.61
	斑块优势度 PLAND	0.60	0.62	0.62
	斑块密度 PD	0.56	0.60	0.75
	斑块平均面积 PMA	0.55	0.58	0.59
	斑块集聚度 PLADJ	0.64	0.62	0.65
“汇”景观 'Sink' landscape	斑块连通度 PCI	0.65	0.62	0.66
	斑块总面积 CA	0.70	0.55	0.63
	斑块优势度 PLAND	0.72	0.60	0.76
	斑块密度 PD	0.57	0.57	0.68
	斑块平均面积 PMA	0.71	0.55	0.65
	斑块集聚度 PLADJ	0.65	0.63	0.66
	斑块连通度 PCI	0.65	0.62	0.66

CA Total class area PLAND Percentage of landscape PD Patch density PMA Patch mean area PLADJ Percentage of like adjacencies PCI Patch cohesion index 下同 The same below

表 2 深圳市西部库区“源、汇”景观格局变化特征

Tab 2 Characteristics of source and sink landscape pattern at western reservoir area in Shenzhen City

水库 Reservoir	景观类型 Landscape type	斑块优势度 PLAND		斑块集聚度 PLADJ		斑块密度 PD	
		2000	2001	2000	2001	2000	2001
西丽 XL	“源”景观: Source landscape	65.71	66.58	94.28	94.89	0.53	0.49
	“汇”景观: Sink landscape	19.31	18.37	88.22	89.08	1.48	1.30
石岩 SY	“源”景观: Source landscape	57.45	60.23	93.06	94.56	0.69	0.41
	“汇”景观: Sink landscape	32.97	30.32	90.19	91.72	1.74	0.87
铁岗 TG	“源”景观: Source landscape	60.59	62.53	93.10	94.22	0.55	0.32
	“汇”景观: Sink landscape	23.48	21.54	86.87	88.26	1.54	1.17

聚度和斑块密度 3 个指标进一步分析研究区景观格局与水体质量之间的关联关系。

从表 2 可以看出,不同年份 3 个水库库区“源”景观的斑块优势度均远大于“汇”景观,而且随着时间的推移,不同库区内“源”景观的斑块优势度不断提高,而“汇”景观的斑块优势度则不断降低。“源”景观的斑块优势度越小,“汇”景观的斑块优势度越大,越有利于削减非点源污染负荷。从研究区“源”、“汇”景观斑块优势度的变化方向来看,整个流域内污染物输出强度在不断增加,而对污染物的削减程度则不断降低,这将导致流域内非点源污染加剧,引起水体质量的恶化。

“源”、“汇”景观的集聚度指数表现了两种景观类型的规模效应。景观集聚度越大,景观之间联系紧密程度越高。2000—2001 年,研究区“源”、“汇”景观的斑块集聚度均不断提高,而且“源”景观的斑块集聚度远大于“汇”景观,说明与“汇”景观相比,“源”景观的规模效应更明显。

从斑块密度来看,景观的斑块密度越大,说明组成该景观的斑块数量越多且分散,景观的破碎化程度越高。2000—2001 年,研究区“源”、“汇”景观的斑块密度均不断降低,但“汇”景观的斑块密度远大于“源”景观,说明“汇”景观的破碎化程度相对比较严重。

斑块集聚度反映同一类型的斑块在空间上集中或分散的程度。如果仅考虑斑块密度,则不论是“源”景观还是“汇”景观,其斑块密度的提高都会引起斑块破碎程度的增加,这样“源”景观引发非点源污染增加,而同时“汇”景观削减非点源污染的几率也相应增加。两者相比,究竟哪个的作用更大,必须结合两者的空间分布特征来比较。

本研究中“源”景观的斑块集聚度大于“汇”景观,而斑块密度小于“汇”景观,这种情况下,“源”景观更容易引发点源污染,而引发非点源污染的程度有所降低,“汇”景观截流非点源污染的几率则有所

增加,可能削减更多的污染物、降低非点源污染对水体质量的威胁程度。但由于受到重力支配的物质流的影响,“源”、“汇”景观在水流方向上的空间位置对其功能的发挥也起着关键作用。在库区内,“汇”景观的分布程度更加松散,更有利于降低非点源污染,但由于“汇”景观多分布于流域上游,使得其“汇”的作用较难发挥,因而无法有效地削减非点源污染。2000—2001 年间,3 个水库的水体质量均表现出下降趋势,这与库区内“汇”景观数量的减小,以及“汇”景观在库区中下游分散程度的降低具有紧密关联。

如果“汇”景观在“源”景观下游分布的数量较大,即可提高“汇”景观削减污染物的作用。那么,“汇”景观在流域下游分布的集聚度是越大越好,还是越小越好呢?目前惯用的方式是在水体周边建设一定数量的水源保护林,以加强“汇”景观对水体的保护作用。实际上,从成本效益的角度来看,由于水源保护林必须具有相当的宽度,才能有效削减上游的大量污染物,这势必会增加水源保护林的建设成本。如果将水库水体周边的林地适当分散到接近水体的中下游区域内,再配以一定的管理措施或集中处理措施,实现对非点源污染的层层削减,则可降低水源保护林的建设成本,并可以与提高城镇密集区林地覆盖率和景观多样性的要求相结合,实现景观生态建设的多赢目标。

3 结 论

处于整个库区尺度上的非建设用地等“汇”景观的格局特征与水体质量表现出较强的关联关系,“源”、“汇”景观的斑块优势度、斑块密度和斑块集聚度可显著影响研究区水体质量的变化特征。因此,在非点源污染防治方面需更多地关注“汇”景观的调控作用,在“源”景观的下游布置林地等“汇”景观,用以削减“源”景观的污染输出。此外,还可根据“集中与分散相结合”的最优景观格局原理^[21],在关

键地段对“源”、“汇”景观予以合理配置和协调, 从而实现降低非点源污染和景观格局优化的双赢目标。

由于“源”、“汇”景观的组合特征是众多因素综合作用的结果, 任意一个因素发生变化都会引起景观格局及其指数的变化, 这为分析景观格局对非点源污染的影响程度带来了一定的困难。此外, 受外界气象条件与人为因素以及监测数据质量的影响, 使得水质指标的变化与景观格局的变化之间存在着复杂的关联特征。这就要求在以后的研究中, 要以系统分析的思想为指导, 综合考虑尺度、数据、指标、模型、方法等一系列要素的影响, 实现对技术的有机整合与对结果的有效判读。

参考文献

- [1] Gburek W J, Fofnar G J. Flow and chemical contributions to streamflow in an upland watershed: A baseflow survey. *Journal of Hydrology* 1999, **217**: 1-18
- [2] Bhaduri B, Harbor J, Engel B A, et al. Assessing watershed-scale long-term hydrologic impacts of land use change using a GIS/NP model. *Environmental Management* 2000, **26**(6): 643-658
- [3] Calder R. Hydrologic effects of land use change// Maidment D R. ed. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1993: 25-54
- [4] Yang L (杨柳), Ma K-M (马克明), Guo Q-H (郭青海), et al. Impacts of the urbanization on waters non-point source pollution. *Chinese Journal of Environmental Science (环境科学)*, 2004, **25**(6): 32-39 (in Chinese)
- [5] Guo Q-H (郭青海), Ma K-M (马克明), Zhao J-Z (赵景柱), et al. A landscape ecological approach for urban non-point source pollution control. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2005, **16**(5): 977-981 (in Chinese)
- [6] Jin J (金洁), Yang J-P (杨京平). Farm land nitrogen loss and its control strategies from the view of water environment. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2005, **16**(3): 579-582 (in Chinese)
- [7] Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), Zhang S-R (张淑荣), et al. Comparative study on the dynamics of non-point source pollution in a heterogeneous landscape. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2002, **22**(6): 808-816 (in Chinese)
- [8] Leon L F, Soulis E D, Kouwen N, et al. Nonpoint source pollution: A distributed water quality modeling approach. *Water Research*, 2001, **35**: 997-1007
- [9] Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰), Xu J-Y (徐建英), et al. Location-weighted landscape contrast index: A scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “Source-Sink” ecological process. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2003, **23**(11): 2406-2413 (in Chinese)
- [10] Liang T (梁涛), Wang H (王浩), Zhang X-M (张秀梅), et al. Transportation processes and rates of heavy metals in an artificial rainstorm runoff under different land use types. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2003, **14**(10): 1756-1760 (in Chinese)
- [11] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M, et al. Relationships between landscape characteristics and non-point source pollution inputs to coastal estuary. *Environmental Management* 1999, **23**(4): 539-549
- [12] Lei X-Z (雷孝章), Chen J-M (陈季明), Zhao W-Q (赵文谦). Study on the control capacity of forest system for non-point pollution. *Chongqing Environmental Science (重庆环境科学)*, 2000, **22**(2): 41-44 (in Chinese)
- [13] Shi L-X (施立新), Yu X-X (余新晓), Ma Q-Y (马钦彦). Review on the study of forest and water quality. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2000, **19**(3): 52-56 (in Chinese)
- [14] Li W-Y (李文宇), Yu X-X (余新晓), Ma Q-Y (马钦彦), et al. Analysis to influence of water conservation forest in Miyun reservoir on water quality. *Science of Soil and Water Conservation (中国水土保持科学)*, 2004, **2**(2): 80-83 (in Chinese)
- [15] Gao C (高超), Zhu J-Y (朱继业), Dou Y-J (窦贻俭), et al. Landscape management practices for the control of non-point source pollution. *Methods and Principles. Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2004, **24**(1): 109-116 (in Chinese)
- [16] Xiao X-P (肖新平), Song Z-M (宋中民), Li F (李峰). *Grey Technology Basis and Application*. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese)
- [17] Xu J-H (徐建华). *Mathematical Methods in Contemporary Geography*. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese)
- [18] Environmental Protection Bureau of Shenzhen Municipality (深圳市环境保护局). *Report on the Environment Quality in Shenzhen City of Guangdong Province 1996-2004*. Shenzhen: Environmental Protection Bureau of Shenzhen Municipality, 2005 (in Chinese)
- [19] Griffith J A, Martinko E A, Price K P. Landscape structure analysis of Kansas at three scales. *Landscape and Urban Planning* 2000, **52**(11): 45-61
- [20] Leit O A B, Ahem J. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape and Urban Planning* 2002, **59**(2): 65-93
- [21] Fu B-J (傅伯杰), Chen L-D (陈利顶), Ma K-M (马克明), et al. *Landscape Ecology Theory and Application*. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)

作者简介 岳隽, 女, 1977年生, 博士, 主要从事景观生态学研究, 发表论文 7篇。E-mail: yuejun163@163.com

责任编辑 杨弘