

丹江口库区湿地植被对南水北调中线工程响应研究

刘文治, 卜红梅, 刘贵华, 张全发

(中国科学院 武汉植物园 水生植物与流域生态重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 丹江口水库是我国南水北调中线工程的水源地, 维护其库区湿地生态系统的健康对调水工程具有非常重要的意义, 而良好的植被条件则是湿地健康和功能完整性的必要基础。通过对丹江口库区湿地植被的全面调查, 表明目前的库区湿地具有较为丰富的植物资源, 分布着多种类型的湿地植物群落。丹江口水库大坝加高后, 大部分的消涨带植被永久被淹没, 并在更高海拔的区域形成新的消涨带湿地植被。进而, 通过构建目前库区湿地植被与环境因子的 CCA 和逐步回归模型预测了新消涨带的潜在植被。结果表明, 丹江口大坝加高蓄水后, 在高坡度的湿地生境下, 植被将由狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 等偏旱生群落组成, 物种多样性也较低; 而在坡度平缓的区域, 双穗雀稗 (*Paspalum paspaloides*) 等湿生群落将占优势, 物种多样性也相对较高。

关键词: 物种多样性; 消涨带; 坡度

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2009)04-0149-04 **中图分类号:** Q948.8, Q143

Wetland Vegetation in the Danjiangkou Reservoir in Response to the Middle-Route of the South-to-North Water Transfer Project

LIU Wen-zhi, BU Hong-mei, LIU Gui-hua, ZHANG Quan-fa

(Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology,

Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The Danjiangkou Reservoir is the water source area of the Middle-Route of the South-to-North Water Transfer Project. Wetland vegetation in the Danjiangkou Reservoir region is essential for the water transfer project. Vegetation survey indicates that there are abundant aquatic plant species and various plant communities in the reservoir wetlands. However, almost all kinds of current wetland vegetation in the reservoir shorelines will be permanently inundated and new wetland vegetation will develop at higher elevation after Danjiangkou Dam heightened. According to canonical correspondence analysis (CCA) and stepwise regression analysis based on the relationships between vegetation and environmental factors, we predict that new wetland vegetation will be dominated by *Cynodon dactylon* and mesophyte characterized by low species diversity in the areas of large slope, and *Paspalum paspaloides* and hygrophyte are dominant species in the flat areas with relatively high species diversity.

Keywords: species diversity; water level fluctuation zone; slope

湿地是地球上最重要的生态系统之一, 主要分布于陆地和水体交接的过渡区域。在国际上普遍被接受的《拉姆萨湿地公约》将湿地定义为不论其为天然或人工、长久或暂时性的沼泽地、泥炭地或水域地带、静止或流动、淡水、半咸水、咸水体, 包括低潮时水深不超过 6 m 的水域^[1]。湿地生态系统具有特殊的生态功能, 不仅为人类提供淡水、食物等多种生活资源, 还在蓄洪防旱、调节气候、降解污染、保护生物多样性

等方面起着非常重要的作用。研究表明仅占中国陆地面积 3.8% 的湿地却提供了 54.9% 的生态系统服务功能^[2]。

丹江口水库位于汉江和丹江的交汇处, 是我国“南水北调”中线工程的水源地, 也是我国重要的湿地自然保护区之一^[3]。丹江口水库建成于 1973 年, 根据中线工程的规划, 到 2010 年, 水库大坝将由现在的 162 m 加高到 176.6 m, 其正常蓄水水位将由 157 m

提高到 170 m,而库区面积也将从现在的 700 km² 增加到 1 022.75 km²。工程正式实施后将每年从丹江口水库调水 9.50 × 10⁹ m³,将较大程度上缓解中线工程沿线的河南、河北、天津、北京等省市的用水困境。

植被是湿地生态系统主要的初级生产者,也是湿地其它生物生长和新陈代谢所需能量的主要来源,良好的植被条件是生态系统功能完整性的必要基础^[4]。丹江口水库大坝加高后,库区湿地生态系统将可能产生较大变化,大部分的消涨带植被将永久被淹没,并在海拔更高的区域形成新的消涨带湿地植被。预测植被对生境变化的响应依赖于构建植物分类群与环境因子间的关系模型^[5]。气候被认为是宏观尺度上植被地理分布的决定因子,而在较小空间尺度上,植被分布格局则主要受地形、土壤性质、海拔等非地带性环境的影响^[6]。

以往对丹江口库区湿地的研究主要集中在植物区系和生态系统服务功能评估上^[7-8]。本研究拟在分析丹江口库区湿地的植被现状基础上,通过构建植被和生境因子间的关系模型,初步预测大坝加高后的新消涨带湿地的潜在植被,旨在为维持丹江口库区湿地生态系统的健康提供科学基础,并更好的服务于南水北调中线工程。

1 研究区概况

丹江口水库位于汉江上游,地跨湖北省十堰市和河南省南阳市。库区地处大巴山与秦岭余脉过渡区。水库所在区域为我国南北气候过渡地带的秦巴小气候区,属于北亚热带大陆性季风气候。库区内年平均气温 15.8℃,极端最高温度 42.6℃,极端最低温度 -13.2℃,1 月份平均气温 2.4℃,7 月份平均气温 28.4℃。无霜期为 228 d,初霜期约在 11 月上旬,终霜期约为 3 月下旬,热量多,霜期短。库区年平均降水量约为 820 mm,降雨量分布不均,多集中在 7—9 月份,降水在空间分布上具有西低东高的特点。土壤以黄棕壤为主,其它土壤类型包括水稻土、石灰土、紫色土^[9]。丹江口水库的水文特征与汉江相反,库区夏季为多雨季节,水库为了防洪,水位保持在汛限水位 149 m 左右,而冬季是枯水季节,丹江口水库抬高水位至正常蓄水位 157 m 进行发电。

从湿地的分类系统来看,丹江口库区湿地主要包括水库蓄水区、库区支流、农用人造湿地等 3 种类型。蓄水区湿地可以划分为水体带和消涨带两部分,水体带是指常年处在淹没状态的水库水体部分,而消涨带则指由于季节性水位的消涨而在水库水体周边形成的周期性出露水面的一段特殊区域,一般指水库死水

位至正常蓄水位之间的区段。丹江口水库的正常蓄水位是 157 m,水库死水位为 139 m。支流湿地是指在库区流域范围内的小流域湿地,丹江口水库的入库支流主要包括丹江、浪河、官山河、滔河、老鹳河、淇河、青塘河等几十条常年或季节性的河流。农用人造湿地是指库区内被用作农业生产的一类人工湿地,主要包括稻田、养殖鱼塘、水塘、灌渠等。

2 调查与分析方法

2.1 湿地植被现状调查与分析方法

2004 年 8 月份在丹江口库区各种湿地类型内设置了 30 个样地,样地面积从 0.01 hm² 至 15 hm² 不等。对样地内植被详细踏查,并确定优势种、常见种及偶见种。为评估湿地内的水生植物资源状况,采集了水生植物标本并鉴定^[10-11]。本研究采用 Cook^[12] 对水生植物的广义的定义,即包括所有蕨类植物门及种子植物门中部分永久或至少一年中数月生活于水中的植物。采用 Braun—Blanquet 法来评估样地内各物种的盖度等级,剔除频度小于 10% 的物种后,构成样地—物种的盖度级矩阵,然后导入 PC—ORD 软件中采用 Twinspan 进行植物群落的数量分类^[13]。

2.2 湿地植被对中线调水工程的响应

2006 年 8 月份在丹江口库区湿地内建立 148 个 1 m × 1 m 的草本植物样方,目测评估各样方内的植被盖度并计算物种丰富度,同时采集坡度、底质、水质参数(pH, DO, NH₄⁺, NO₃⁻)、人为干扰、离水体距离、周边土地利用等 9 个环境因子。采用 CANOCO 4.5 软件中的 CCA 来分析影响湿地植被分布的环境条件^[14],同时在 SPSS 10.0 软件中利用逐步回归分析来探讨库区湿地植被物种丰富度的决定因子,最后通过上述的植被—环境关系模型来预测大坝加高后新库区湿地的潜在植被。

3 结果与分析

3.1 湿地植被现状

丹江口库区湿地拥有较为丰富的水生维管束植物资源,共计有 30 科 56 属 90 种,其中蕨类植物 3 科 3 属 4 种,单子叶植物 12 科 31 属 51 种,双子叶植物 15 科 22 属 35 种。禾本科(*Gramineae*)、莎草科(*Cyperaceae*)分别含 10 属和 8 属,是含属数最多的两个科,其次是玄参科(*Scrophulariaceae*),含有 4 属,其余各科都只含有 2 属或 1 属。含种数较多的科有莎草科共 17 种、禾本科 11 种、蓼科(*Polygonaceae*) 7 种、眼子菜科(*Potamogetonaceae*) 6 种、玄参科 5 种。湿生植物的有 40 种,挺水植物有 29 种,这两

种生活型的植物占丹江口库区湿地水生植物总数的77.5%,是该湿地的主要生活型,它们分布十分广泛。漂浮植物3种,浮叶植物3种,沉水植物15种,分别占3.2%,3.2%和16%,主要分布在河滩上的积水坑,岸边溪流、水田和浅水塘中,目前水库的敞水区没有高等植物分布。

Twinspan将30个样地分为15组,依据《中国植被》的分类系统^[15]并结合野外调查结果和群落的特征,将丹江口库区湿地植被划分为14个群丛。它们为:(1)狗牙根—齿果酸模群丛(*Cynodon dactylon*—*Rumex dentatus* Ass.);(2)通泉草+鹅不食群丛(*Mazus gracilis* + *Centipede minima* Ass.);(3)稗群丛(*Echinochloa crusgalli* Ass.);(4)长刺酸模群丛(*Rumex maritimus* Ass.);(5)狗牙根+宜昌飘拂草+烟台飘拂草—慈姑群丛(*Cynodon dactylon* + *Fimbristylis henryi* + *Fimbristylis stauntonii*—*Sagittaria sagittifolia* Ass.);(6)狗牙根群丛(*Cynodon dactylon* Ass.);(7)双穗雀稗群丛(*Paxpalum distichum* Ass.);(8)双穗雀稗+狼尾草群丛(*Paxpalum distichum* + *Pennisetum alopecuroides* Ass.);(9)柳叶箬群丛(*Isachne globosa* Ass.);(10)蔗草+双穗雀稗—马来眼子菜+黑藻群丛(*Scirpus triqueter* + *Paxpalum distichum*—*Potamogeton malaianus* + *Hydrilla verticillata* Ass.);(11)双穗雀稗+狗牙根+光头稗子群丛(*Paxpalum distichum* + *Cynodon dactylon* + *Echinochloa colonum* Ass.);(12)穿叶眼子菜+黑藻群丛(*Potamogeton perfoliatus* + *Hydrilla verticillata* Ass.);(13)大茨藻+黑藻—穗花狐尾藻群丛(*Najas marina* + *Hydrilla verticillata*—*Myriophyllum spicatum* Ass.);(14)黄花狸藻+狸藻—田字萍群丛(*Utricularia aurea* + *Utricularia vulgaris*—*Isachne globosa* Ass.)。

3.2 湿地植被对中线调水工程的响应

丹江口大坝加高蓄水后,库区湿地生态系统将产生剧烈的变化,现存的大部分消涨带将被淹没,其中的绝大多数陆生植物将会消亡^[16],因此新消涨带湿地植被的建立首先面临着物种来源的问题。目前丹江口水库的消涨带也是建立在以前的林地和农田之上,这意味大坝加高后新库区湿地植被的重建可以依赖于水流扩散的繁殖体以及淹没区周边的湿生物种源。在存在植物种源的前提下,生境条件将是决定库区湿地植被类型和结构的最主要因素。因此我们通过建立植被—环境关系模型来探讨大坝加高后新库区湿地的潜在植被。根据优势种的生活型把上述14种群丛划分为5个主要的植被类型,分别是类型

(狗牙根、稗、长刺酸模等多种优势种)、类型(狗牙根为单一优势种)、类型(双穗雀稗为单一优势种)、类型(双穗雀稗、蔗草、柳叶箬等多种优势种)、类型(沉水植物为优势种)。

CCA排序分析表明,坡度、离水面距离、周边土地利用等因子能显著影响库区湿地植被的分布,以狗牙根、长刺酸模、稗等为优势种的偏旱生群落主要分布在高坡度区域,距离水体也较远,同时底质多由石砾、粗砂组成;以双穗雀稗、柳叶箬、蔗草等为优势种的湿生植物群落的生境特征主要为坡度平缓,距离水体较近,且底质多为黄壤土,土壤湿度也相应较大;而以黑藻、眼子菜属植物为优势种的沉水植物群落则主要分布在库区内各支流的沉水生境中(图1)。

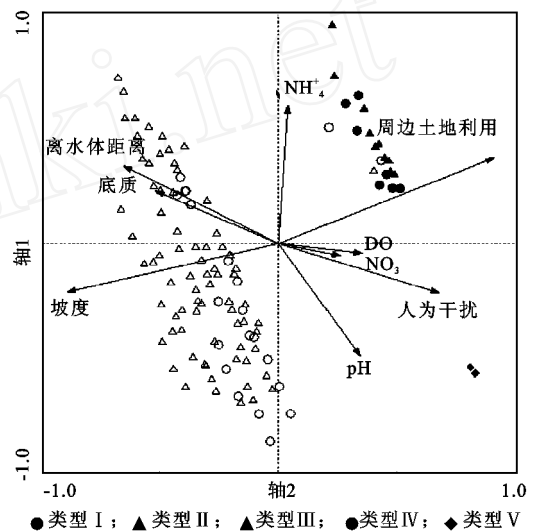


图1 丹江口库区湿地植被的CCA样地—环境因子排序

物种丰富度用单位面积内的物种数目来表示,是表征物种多样性的主要指标之一。从逐步回归分析的结果来看,坡度是影响丹江口库区湿地植被物种丰富度的首要因子,植被盖度也在一定程度上影响物种丰富度,两者共计解释了物种丰富度44%的变异量(表1)。在坡度较大的湿地区域,由于频繁的水位消涨,土壤水蚀严重,造成土壤保水保肥能力较弱,所以在植物生长期内湿地生境趋于中生或旱生,导致植被的物种丰富度较低;而在低坡度区域,则形成了较为典型的湿地生境,适合于湿生和水生植物的生长与繁衍,因此相应的物种丰富度也较高。

表1 丹江口库区湿地植被物种丰富度和生境因子的逐步回归分析

自变量	回归系数	P	R ²
坡度	-0.409	<0.000 1	0.364
植被盖度	0.338	<0.000 1	0.440

根据 CCA 和逐步回归分析预测丹江口大坝加高后库区湿地的潜在植被概况:在新库区湿地的高坡度区域,在长期的自然和人为干扰下,生境条件日趋恶化,将形成由偏旱生植物(如狗牙根、稗、长刺酸模)组成的植物群落,物种多样性也较低;而在坡度较小的区域,原始土壤将能够续存,同时由于泥沙和营养的不断沉积,将形成良好的湿地生境,将形成由湿生(如双穗雀稗、莎草科)或水生植物组成的植被,而且物种多样性和植被盖度都相对较高。由于大坝加高后丹江口水库的年内水位波动将达到 20 m,因此沉水植被仍将难以在水库敞水区生存,而主要分布在库区支流的一些沉水生境中。

4 讨论

植被与环境关系定量分析的方法可以大致分为两类:第一类是以直接梯度分析、数量分类和排序为主,结合统计分析,揭示植被空间变化和环境因子的关系,主要的排序方法包括对应分析(CA)、主成分分析(PCA)、去势对应分析(DCA)、典范对应分析(CCA)等。但排序只能得出研究区域的主要环境梯度,提供了物种聚集和植物群落的概略描述^[17]。第二类是以广义线性模型(GLM)、广义加法模型(GAM)、人工神经网络(ANN)、分类回归树(CART)等为代表的模型方法。GLM 和 GAM 等方法扩展了植物种与环境变量之间的关系模型,能够深入地探讨植物种与环境间的关系。

国外生态学家很早就开展了河岸带植被对河流、水库水文变化响应的研究。Franz 和 Bazzaz 等^[18]早在 1974 年就通过构建数量模型来模拟水库回水区植被在不同洪水水位的分布情况。Jansson 和 Nilsson 等^[19]通过比较自然河流与受调节的河流来评估建坝等水利工程对瑞典北部河流植被的影响。Rains 等^[20]构建了地下水位和河流、水库岸带植被的关系模型,从而模拟植被分布对水库不同控制水位的响应。虽然我国已经兴建了 2 万余座高程 15 m 以上的水坝,是世界上拥有水坝最多的国家^[21],但在模拟河流植被对水利工程响应方面的研究还很缺乏。

根据南水北调中线工程规划,丹江口水库大坝将从目前的 162 m 加高到 176.6 m,水库正常蓄水位由 157 m 抬高到 170 m,相应库容由目前的 $1.75 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增加到 $2.91 \times 10^{10} \text{ m}^3$,因此目前分布在丹江口水库死水位 139 m 至正常蓄水位 157 m 间的大部分滩涂湿地植被将被永久性的淹没。丹江口大坝加高蓄水后,将会在水库周边更高海拔(150~170 m)区域内形成新的消涨带湿地植被,湿地植被的重建将依赖

于原有湿地植被的续存和外来繁殖体的扩散迁入。丹江口水库原有湿地植被被破坏后,自然恢复并形成健康稳定的湿地生态系统需要一个较为漫长的过程^[22],在这期间可能会导致湿地植物多样性的进一步丧失,同时存在着外来物种的入侵风险。

本研究揭示坡度是影响丹江口库区湿地植被分布和物种多样性的最主要环境因子。丹江口库区的湖北部分位于大巴山余脉武当山脉,而河南的大部分区域则属于南阳盆地,这就造成了库区湿地内的坡度差异,而由坡度差异导致的异质生境也最终在一定程度上决定了库区湿地植被的分布和物种多样性。借助于大比例尺 DEM 提取大坝加高后新库区湿地的坡度,再结合上述建立的植被—环境因子关系模型,将有助于进一步进行新库区湿地植被分布的模拟研究。

[参 考 文 献]

- [1] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000:25-35.
- [2] An S Q, Li H B, Guan B H, et al. China's natural wetlands: Past problems, current status, and future challenges[J]. *Ambio*, 2007, 36(4):335-342.
- [3] 国家林业局. 中国湿地保护行动计划[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000: 39.
- [4] Keddy P A. Wetland Ecology: Principles and Conservation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [5] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models[J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(9): 993-1009.
- [6] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 地形对亚热带山地景观尺度植被格局影响的梯度分析[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(4): 430-435.
- [7] 刘文治, 张全发, 刘贵华, 等. 丹江口库区湿地水生维管束植物的区系研究[J]. *武汉植物学研究*, 2005, 23(5): 449-454.
- [8] 李玉英, 李益民, 高宛莉, 等. 丹江口水库湿地生态系统服务功能研究[J]. *南阳师范学院学报*, 2007, 6(3): 46-50.
- [9] 刘占朝, 王团荣, 马喜明. 河南省丹江口库区湿地自然保护区现状与管理对策[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(4): 66-68.
- [10] 中国科学院植物研究所. 中国高等植物图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1976.
- [11] 中国科学院武汉植物研究所. 中国水生维管束植物图谱[M]. 武汉: 湖北人民出版社, 1983.
- [12] Cook C D K. Aquatic plant book[M]. The Hague: SPB Academic Publishing, 1990.
- [13] McCune B, Mefford M J. PC—ORD, Multivariate analysis of ecological data, Version 4.32 MjM Software [M]. Oregon: Gleneden Beach, 1999.

(下转第 185 页)

量化,因此相应的预测是在目前稳定的土地利用政策的前提下进行的,若能进一步融入自然和政策因子将可以改进预测的效果,今后在这一方面需要进一步研究。且在参数确定过程中引用了相应的预测数据,可能存有一定的人为影响,因此本研究预测的结果只是从社会经济发展层面反映未来安徽省土地利用格局的演变趋势,并非土地利用变化的惟一的真实结果。研究旨在为土地利用总体规划修编和土地利用政策的制定提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] Miehiro F, Takao K. Changes in the landscape structure of the Nagara River Basin, central Japan[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 70(3): 261-270.
- [2] Guillem C, Danielle D, Joan L P. Landcover mapping with patch-derived landscape index[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2004, 69(4): 437-449.
- [3] 周华锋, 马克明, 傅伯杰. 人类活动对北京东灵山地区景观格局影响分析[J]. *自然资源学报*, 1999, 14(2): 117-123.
- [4] 陈文波, 肖笃宁. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 121-125.
- [5] 张希彪. 泾河中上游流域土地利用格局变化与驱动因子分析[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 137-152.
- [6] 周生路, 朱青, 赵其国. 近十几年来南京市土地利用变化结构特征分析[J]. *土壤*, 2005, 37(4): 394-399.
- [7] 刘序, 陈美球, 陈文波, 等. 鄱阳湖地区 1985—2000 年土地利用格局变化及其社会经济驱动力研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2006, 33(1): 117-122.
- [8] 曾辉, 江子瀛, 孔宁宁, 等. 快速城市化景观的空间自相关特征分析: 以深圳市龙华地区为例[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2000, 36(6): 824-831.
- [9] 史培军, 陈晋, 潘耀忠, 等. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(2): 151-160.
- [10] 田光进, 张增祥, 王长有, 等. 基于遥感与 GIS 的海口市土地利用结构动态变化研究[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(6): 543-546.
- [11] 韦素琼, 陈健飞. 福建省土地利用动态变化及其预测分析[J]. *福建师范大学学报*, 2003, 19(4): 85-91.
- [12] 陈利顶, 吕一河, 傅伯杰, 等. 基于模式识别的景观格局分析与尺度转换研究框架[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 663-670.
- [13] 安徽省统计局. 安徽统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1997—2006.
- [14] Takashi Hoshi, Satoshi Hoshino, Ichiro Nomura. Application of GKSIM Model for Estimating the Changes of Land Use and Land Cover[C]// Shaanxi Ansa: 19th ACRS(Asian Conference on Remote Sensing), 1998: 1-6.
- [15] Imbernon J. A comparison of the driving forces behind deforestation in the Peruvian and the Brazilian Amazon[J]. *Ambio*, 1999, 28(6): 509-513.
- [16] 摆万奇, 丁贤忠. 内蒙古自治区奈曼旗土地利用变化预测研究[J]. *资源科学*, 2003, 25(2): 73-76.
- [17] 张克锋, 彭晋福, 张定祥, 等. 基于城镇化水平和 GDP 情景下中国未来 30 年土地利用变化模拟[J]. *中国土地科学*, 2007, 21(2): 58-64.
- [18] 何春阳, 李景刚, 史培军, 等. 中国北方未来土地利用变化情景模拟[J]. *地理学报*, 2004, 50(4): 599-607.
- [19] 任志远, 李晶, 王小峰, 等. 城郊土地利用变化与区域生态安全动态[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 3-170.
- [14] Ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO reference manual and user's guide to canoco for windows: Software for canonical community ordination (version 4.5) [M]. New York: Microcomputer Power, 1998.
- [15] 中国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [16] Nilsson C, Berggren K. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation[J]. *BioScience*, 2000, 50(9): 783-792.
- [17] 朱源, 康慕谊. 排序和广义线性模型与广义可加模型在植物种与环境关系研究中的应用[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(7): 807-811.
- [18] Franz E H, Bazzaz F A. Simulation of vegetation response to modified hydrologic regimes: A probabilistic model based on niche differentiation in a floodplain forest[J]. *Ecology*, 1997, 58(1): 176-183.
- [19] Jansson R, Nilsson C, Dynesius M, et al. Effects of river regulation on river-margin vegetation: a comparison of eight boreal rivers[J]. *Ecological Applications* 2000, 10(1): 203-224.
- [20] Rains M C, Mount J F, Larsen E W. Simulated changes in shallow groundwater and vegetation distributions under different reservoir operations scenarios[J]. *Ecological Applications*, 2004, 14(1): 192-207.
- [21] WCD(World Commission on Dams). Dams and development: a new framework for decision-making[M]. London: Earthscan Publications, 2000.
- [22] Luckeydoo L M, Fausey N R, Brown L C, et al. Early development of vascular vegetation of constructed wetlands in northwest Ohio receiving agricultural waters[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 88(1): 89-94.

(上接第 152 页)