

南昌红角洲景观渠水生态现状评价及对策研究

罗思^{1,2}, 刘启超^{1,2}, 金志军^{1,2}, 单承康^{1*}

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 中电建生态环境设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘要:以南昌市红角洲景观渠为研究对象,通过水生生境调查、水质监测、水生生物资源调查等方式对其水生态现状进行了综合评价。研究发现,红角洲景观渠为劣V类水体,主要超标指标为总氮、氨氮、总磷,各渠道的综合营养状态指数在52.28~68.20之间,达到了轻度-中度富营养化水平。红角洲景观渠共检测到90种浮游植物、48种浮游动物、10种鱼类,优势藻类为硅藻、绿藻和蓝藻,优势浮游动物为原生动物和轮虫,优势鱼类为杂食性鱼类。红角洲景观渠存在生境多样性低、水体自净能力受损、生物群落结构简单等水生态问题,建议从截污控源、生境改善、水力调控、群落构建等4个层面尽快开展水生态修复。

关键词:城市景观水体;富营养化;水生态修复;红角洲景观渠;南昌市

中图分类号:X826

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2020)04-0038-05

Ecological Evaluation and Countermeasure Research of Landscape Water in Hongjiaozhou of Nanchang

LUO Si^{1,2}, LIU Qi-chao^{1,2}, JIN Zhi-jun^{1,2}, SHAN Cheng-kang^{1*}

(1. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China; 2. Power

China Ecological Environment Design & Research Corporation Limited, Suzhou, Jiangsu 215000, China)

Abstract: In this study, the current ecological status of Hongjiaozhou landscape water in Nanchang was comprehensively evaluated through hydrophytic habitat investigation, water quality monitoring and aquatic organism survey. Results showed that the water quality was inferior to class V. The main indicators exceeding the standards were total nitrogen, ammonia nitrogen and total phosphorus. The comprehensive trophic level index was between 52.28 and 68.20, showing the landscape water was slight-moderate eutrophic. A total of 90 phytoplankton species, 48 zooplankton species and 10 fish species were detected, bacillariophyta, chlorophyta, cyanobacteria, protozoa, rotifer and omnivorous fish were dominated. It was concluded that Hongjiaozhou landscape water had ecological problems such as lower habitat diversity, weak water self-purification capacity and simple community structure. It proposed on pollution source control, habitat improvement, hydroenergy regulation and community optimization for water ecological restoration.

Key words: Urban landscape water; Eutrophication; Water ecological restoration; Hongjiaozhou landscape ditch; Nanchang

城市景观水体作为城市建设的重要组成部分,是人们休闲娱乐和亲近自然的重要场所,具有多种生态服务功能^[1]。为了满足城市居民对滨水景观的需求,很多居住小区、公园和绿地配套修建了人工湖泊、景观水池、景观河道等景观水体。然而,由于生态基流不足、面源污染难以控制,以及水生态

收稿日期:2019-05-06;修订日期:2020-04-08

基金项目:贵州省科学技术基金资助项目(黔科合基础[2018]1169);中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司电力科学技术发展基金资助项目(YJ2016-17)

作者简介:罗思(1987—),男,湖南资兴人,高级工程师,博士,主要从事水生态修复和鱼类保护工作。

*通信作者:单承康 E-mail: 281452921@qq.com

系统结构不协调,特别是城市景观水体存在水深较浅、蓄水量较小和环境相对封闭等情况^[2-3],导致景观水体常面临水污染严重、水体富营养化、底泥黑臭等水生态问题^[4]。虽然近年来我国加速开展生态文明建设,一些水生态问题突出的江河湖库相继得以治理和修复,但城市景观水体并未得到足够的重视。城市景观水体作为城市居民生活环境的一部分,维持其水生态系统健康稳定,对于改善居民生活质量具有重要意义。

红角洲景观渠位于南昌市红谷滩新区,是打造山水都城精华示范区的重要依托对象。由于红角洲景观渠道纵横交错、运行模式混乱、生态基流量不足,其运行后便出现了严重的水生态问题^[5]。为了改善红角洲景观渠的水生态环境质量,今从水生生境、水质、水生生物资源等层面深度剖析其存在的水生态问题,并提出相应的生态修复对策,为其他城市景观水体的生态修复方案设计提供思路借鉴。

1 材料与方法

1.1 采样点位

共设置 12 个水质监测和浮游动植物采样点位,以及 6 个鱼类资源调查点位(见图 1)。由于各景观渠道的水深均 < 5 m,因而只在调查点位水面下方 0.5 m 处设置 1 个采样点。

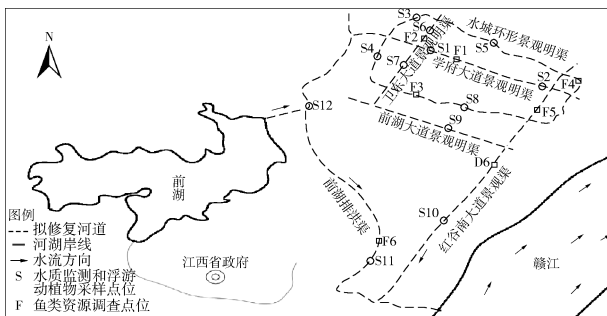


图 1 采样点位布设

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 水生生境调查

通过收集与分析红角洲景观渠的设计资料及相关文献,掌握各景观渠道的景观水位、底板高程、河道断面形式。根据红角洲景观渠的水系组成特点,利用 Google 卫星地图的距离测量工具对河道长度进行测量,并通过现场踏勘加以校正。河道宽

度采用测距仪测量,河道水深、底泥淤积情况、流速、两岸土地利用类型及水生植物分布情况通过现场测量和观察记录的方式详细调查。

1.3 水质监测

于 2018 年 5 月对红角洲景观渠进行水质采样监测,监测指标包括水温(T)、透明度(SD)、溶解氧(DO)、氨氮(NH₃-N)、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(I_{Mn})、悬浮物(SS)、叶绿素 a(Chl-a)等。水质监测方式为瞬时采样,水温、pH 值、DO 采用 HACH HQ30D 型便携式溶氧仪现场测定,SD 采用塞氏盘法现场测定,其他指标参照《水和废水监测分析方法》(第四版)测定^[6]。监测结果采用单因子评价法评价,水体富营养化程度参照文献^[7]中的综合营养状态指数法评价。

1.4 水生生物资源调查

水生生物资源调查内容包括浮游植物、浮游动物和鱼类资源,与水质监测同步进行。浮游动植物的采集、固定、浓缩与计数方法参照文献^[8],鱼类资源调查通过分析采样点位附近渔民及垂钓者所得渔获物进行。浮游动植物资源调查共采集了 12 个点位的水样(与水质监测点位相同),鱼类资源调查分析了 6 个点位的鱼类组成情况,浮游动植物优势度指数计算公式参照文献^[9]。

2 结果与分析

2.1 水生生境

红角洲景观渠为人工渠道,河道长度在 1.25 km ~ 4.81 km 之间,河面宽度在 10 m ~ 55 m 之间。河道内水深较浅,底质淤积严重,淤泥厚度在 0.10 m ~ 0.30 m 之间,部分河道可见裸露淤泥。河道两岸均已硬化,缺乏挺水植物着生基质,断面形式为矩形或倒梯形,生境形式较为单一,生境适宜性较差。除水城环形景观明渠和红谷南大道景观渠分布有少量的水生植物外,其他各渠道均无水生植物分布迹象。红角洲景观渠水体流动性较差,多数渠道流向不明,流动缓慢,仅前湖排洪渠和红谷南大道景观渠南段具有稳定的水体流向。

2.2 水质

红角洲景观渠水质监测结果见表 1。由表 1 可见,TN 质量浓度较高,除 S12 点位外,其余各点位测定值均高于 V 类水质标准限值(2.0 mg/L);S1、S7、S8 点位的 NH₃-N 质量浓度较高,均超过 V 类水质标准

限值(2.0 mg/L), 氨氮占比($\text{NH}_3\text{-N}/\text{TN}$) > 30%; 各点位 TP 测定值在 0.17 mg/L ~ 0.62 mg/L 之间, 氮磷比(N/P)在 6.32 ~ 64.76 之间。红角洲景观渠水体

富营养化较为严重, 各点位的综合营养状态指数在 52.28 ~ 68.20 之间(见表 2)。整体而言, 红角洲景观渠呈现轻度或中度富营养化状态, 为劣 V 类水体。

表 1 红角洲景观渠水质监测结果

Table 1 Results of water quality measurement in Hongjiaozhou landscape river

监测指标	监测点位											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
T $\theta/^\circ\text{C}$	24.2	24.8	24.5	24.7	24.8	22.8	24.9	23.2	25.4	25.3	25.1	26.2
DO $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	7.25	6.71	4.54	5.18	5.97	2.64	2.43	4.15	6.15	9.48	5.30	7.23
$\text{NH}_3\text{-N}$ $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	6.34	0.17	0.25	0.21	0.82	1.55	13.8	4.74	2.00	1.52	0.16	0.25
TN $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	21.0	3.97	5.02	5.51	7.60	10.9	19.9	13.6	7.29	6.90	4.36	1.39
氨氮占比/%	30.19	4.28	4.98	3.81	10.79	14.22	69.35	34.85	27.43	22.03	3.67	17.99
$\text{NO}_3\text{-N}$ $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.12	1.09	2.36	1.72	0.30	0.33	—	0.25	0.45	0.62	2.34	0.30
TP $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	0.62	0.22	0.21	0.24	0.21	0.17	0.43	0.21	0.28	0.36	0.32	0.22
氮磷比	33.87	18.05	23.90	22.96	36.19	64.12	46.28	64.76	26.04	19.17	13.62	6.32
SD h/m	0.45	0.40	0.30	0.23	0.21	0.33	0.39	0.30	0.51	0.20	0.21	0.18
SS $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	24	33	44	44	30	15	16	18	11	40	14	16
Chl-a $\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	6.54	3.88	4.59	2.79	5.35	3.32	12.4	3.59	9.98	9.59	1.70	7.78
COD $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	28	11	24	27	11	15	20	24	24	16	20	19
BOD_5 $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	5.7	2.2	4.9	5.5	2.2	3.0	4.1	4.9	4.9	3.3	4.1	3.9
I_{Mn} $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	2.8	2.1	2.0	1.8	4.0	3.7	4.5	3.7	2.8	2.0	1.1	1.6

表 2 红角洲景观渠的营养状态指数

Table 2 Trophic status index of Hongjiaozhou landscape river

参数	监测点位											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
TLI(Chl-a)	45.39	39.72	41.55	36.14	43.21	38.03	52.34	38.88	49.98	49.55	30.76	47.28
TLI(TP)	86.60	69.77	69.02	71.18	69.01	65.58	80.65	69.01	73.69	77.77	75.86	69.77
TLI(TN)	106.10	77.89	81.86	83.44	88.89	95.00	105.19	98.74	88.18	87.25	79.47	60.11
TLI(SD)	66.67	68.96	74.54	79.69	81.46	72.69	69.45	74.54	64.24	82.40	81.46	84.45
TLI(I_{Mn})	28.49	20.83	19.53	16.73	37.98	35.90	41.11	35.90	28.49	19.53	3.63	13.60
TLI(Σ) ^①	64.81	54.10	55.94	55.62	62.29	59.37	68.20	61.25	59.95	62.12	52.28	54.44

①综合营养状态指数。

2.3 水生生物资源

2.3.1 浮游植物和浮游动物

红角洲景观渠共检测到 90 种(或属)藻类, 隶属于 7 个门类, 其中, 硅藻占 38.89%; 绿藻占 36.67%; 蓝藻占 10.00%; 裸藻占 8.89%; 甲藻占 2.22%; 黄藻占 2.22%; 隐藻占 1.11%。优势种类为近缘黄丝藻、尾裸藻、尖尾裸藻、卵形隐藻、四尾栅藻、水溪绿球藻、梅尼小环藻、针形纤维藻。蓝藻主要包括鱼腥藻、颤藻、铜绿微囊藻。学府大道景观明渠优势种为近缘黄丝藻和颤藻; 水城环形景观明渠优势种为卵型隐藻、近缘黄丝藻、尾裸藻、四尾栅藻和颤藻; 卫东大道景观明渠优势种为卵型隐藻、近缘黄丝藻、尾裸藻、四尾栅藻和铜绿微囊藻; 前湖大道景观明渠优势种为卵型隐藻、近缘黄丝

藻、尾裸藻和尖尾裸藻。

红角洲景观渠共检测到 48 种(或属)浮游动物, 分属 4 大门类, 其中, 原生动物占 58.33%; 轮虫占 29.17%; 枝角类占 8.33%; 桡足类占 4.17%。优势度分析结果显示, 浮游动物优势种类为片口沙壳虫、杂葫芦虫、扁壳虫、液变形虫、壶状臂尾轮虫、剪形臂尾轮虫、萼花臂尾轮虫、长肢多枝轮虫、裸腹蚤、剑水蚤。

2.3.2 鱼类资源

红角洲景观渠共调查到 10 种鱼类, 隶属于 4 目 4 科。鱼类群落结构较为简单, 种类较少。鱼类资源主要为鲤、鲫、鲮、红鳍原鲃、似鳊、黄颡鱼、虾虎鱼、食蚊鱼、麦穗鱼、棒花鱼等, 优势种类为杂食性鱼类。

3 讨论

3.1 存在的水生态问题分析

城市景观水体通常只考虑景观手法和表现效果,多数存在水生态问题^[10]。红角洲景观渠道两岸均为硬质驳岸,挺水植物无法着生,单一河道生境形式也使得鱼类栖息隐蔽场所有限。虽然2014年实施了水系活化工程,从赣江调取水,以 $2.0\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量经前湖对红角洲景观渠进行基流量补充,但由于在设计之初未考虑渠底坡度,除前湖排洪渠和学府大道景观明渠具有一定坡度外,其他各渠道的设计坡度几乎为0,加之红角洲景观渠纵横交错,两渠交汇形成对冲区域,导致水流速度极其缓慢,流向不明。此外,红角洲景观渠虽然修建了多座闸坝,但目前还未形成合理的运行调度方案。水体流速过小也使得景观渠淤塞严重,水体交换周期较长,水体自净能力受损,水质恶化严重。

水质监测数据显示,红角洲景观渠为劣V类水体,TN质量浓度较高,水体富营养化较为严重,达到了轻度-中度富营养化水平。一般认为,藻类健康生长及生理平衡所需的氮磷比值为 $16^{[11]}$,当淡水生态系统的氮磷比值 >20 时被认为是磷限制,当氮磷比值 <10 时被认为是氮限制^[12]。然而,许海等^[13]研究发现,当氮磷含量均较为充足时,氮磷比值对藻类生长速率已无影响。虽然红角洲景观渠的氮磷比值在 $6.32\sim 64.76$ 之间,但氮磷质量浓度均较高,仍具备爆发蓝绿藻水华的营养盐条件。值得注意的是,红角洲景观渠的部分渠道氨氮占比较高,说明附近可能存在排污现象。通过南昌市雨水规划图发现,红角洲景观渠存在10处雨水排出口。此外,现场踏勘发现卫东大道景观明渠、水城环形景观明渠及红谷南大道景观渠存在多处排污口,这些雨水口和污水口可能也是红角洲景观渠水生态问题突出的主要原因之一。

红角洲景观渠注重景观设计,而水面以下的水生生物群落缺乏人为引导和调控。水生生物资源调查结果显示,红角洲景观渠优势种类为杂食性鱼类,缺乏滤食性和肉食性鱼类,生物完整性差^[14]。经典的生物操作认为,增加大型浮游动物丰度是控制浮游植物(藻类)的关键^[15]。由于杂食性鱼类占优,大型浮游动物如桡足类、枝角类被抑制,而个体较小的原生动物及轮虫类资源量相对较高,使得藻类缺乏有效控制而大量繁殖。红角洲景观渠的藻类资源较为丰富,水体趋于老化,优势种类为具

有鞭毛的裸藻和耐污型藻类。这说明红角洲景观渠水体交换速率较慢,污染较为严重,有必要采取措施加强水体交换,控制污染负荷。此外,红角洲景观渠还存在一定数量的蓝绿藻水华种类,夏季极易暴发蓝藻水华。

3.2 水生态修复对策

红角洲景观渠水生态问题较为复杂,并存在水质进一步恶化的趋势。为改善水生态环境质量,维持并充分发挥其生态服务功能,有必要在全域开展水生态修复。

(1) 截污控源,降低污染负荷。控制外源污染是水生态修复的重要前提,外源污染能否得到有效控制决定着整个水生态修复工作的成败^[15]。因此,应加强调查力度,及时封堵排污口,完善雨污管网。此外,应尽快开展前湖水系水环境治理工程,从源头着手,净化上游来水。

(2) 改善生境,丰富生境形式。生境多样性直接决定了生物多样性的承载能力^[16],生境修复是水生态修复的第一步。建议采取布设复氧设备和生态浮岛等方式改善生境,丰富生境形式。此外,还可以通过闸坝的运行调度改变红角洲景观渠的流速流态,进一步丰富生境形式。

(3) 引水活化,优化调度方案。改善水动力条件已被证实能够提升水体自净能力^[17]。根据纵霄等^[18]的研究成果,从赣江以 $3.0\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量引水进入前湖水系,可以使昌北片区各个控制断面(包括红角洲景观渠出口)的水质达标率达到89%以上。因此,应加快赣江取水工程进度,尽早进行水力调控,并制定闸坝运行调度方案,避免水流对冲和出现死水区域。

(4) 师法自然,调控生物群落。红角洲景观渠生物群落结构简单,协调性较差。建议投放适量的肉食性鱼类,以控制景观渠内杂食性野杂鱼类的生物量,并投放适量的滤食性鱼类,以控制景观渠内的浮游植物。此外,由于水生植物与藻类可以通过营养物质竞争、他感作用等形式相互抑制^[19],因而可以采用构建水生植物群落的方式转换水体稳态,构建清水型水生态系统。

4 结语

红角洲景观渠存在的水生态问题主要包括:①河道两岸硬化严重,生境形式较为单一,水体流动性较差,河道淤塞严重;②水体污染较为严重,TN

浓度严重超标,部分河道 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 浓度较高,水体呈现轻度-中度富营养化状态;③水生生物群落结构较为简单,鱼类种类较少,以杂食性野杂鱼类为主,浮游植物种类丰富,极易暴发蓝藻水华。基于红角洲景观渠存在的水生态问题,建议从截污控源、生境改善、水力调控、群落构建等4个层面尽快开展水生态修复。

[参考文献]

- [1] SMITH S V, RENWICK W H, BARTLEY J D, et al. Distribution and significance of small, artificial water bodies across the United States landscape [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 299(1/2/3): 21-36.
- [2] 郭迎庆. 城市景观水体的污染控制和修复技术[J]. *环境科学与技术*, 2005, 28(B06): 148-150.
- [3] 夏邦天, 郑广宏, 徐杭军, 等. 城市景观水体治理技术研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(6): 67-72.
- [4] 胡世龙, 纪佳渊, 陈荣, 等. 西安市城市景观水体富营养化现状及成因分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2016, 28(5): 62-65.
- [5] 冯扬. 南昌新城居住区功能湿地系统规划研究——以红角洲片区为例[D]. 厦门: 华侨大学, 2014.
- [6] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [7] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. *中国环境监测*, 2002, 18(5): 47-49.
- [8] 赵长森, 夏军, 王纲胜, 等. 淮河流域水生态环境现状评价与

分析[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(12): 1698-1704.

- [9] 李懿森, 李茂田, 艾威, 等. 江西柘林水库春季浮游藻类、叶绿素 a 与环境因子的分布、关系及意义[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(3): 625-636.
- [10] 陈永, 刘滢, 涂兆林, 等. 城市景观水体现存问题分析[C]//全国给排水技术信息网. 全国给排水技术信息网 2009 年年会论文集. 北京: 全国给排水技术信息网, 2009.
- [11] KLAUSMEIER C A, LITCHMAN E, DAUFRESNE T, et al. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton [J]. *Nature (London)*, 2004, 429(6988): 171-174.
- [12] SCHANZ F, JUON H. Two different methods of evaluating nutrient limitations of periphyton bioassays, using water from the River Rhine and eight of its tributaries [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 102(3): 187-195.
- [13] 许海, 朱广伟, 秦伯强, 等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(10): 1676-1683.
- [14] KARR J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. *Fisheries*, 1981, 6(6): 21-27.
- [15] 吴振斌. 水生植物与水体生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [16] 沈才智, 刘丙万. 生境对生物多样性影响研究进展[J]. *现代农业科技*, 2011(23): 305-306.
- [17] 王云中, 杨建成, 陈兴都, 等. 不同水动力条件对景观水体富营养化模拟过程中藻类演替的影响[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, 23(2): 23-27.
- [18] 纵霄, 刘松平, 张亚, 等. 昌北水环境综合治理工程措施效果评估与分析[J]. *水力发电*, 2018, 44(7): 9-14.
- [19] 徐洪文, 卢妍. 水生植物在水生态修复中的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(3): 413-416.

(上接第14页)

- [11] WHITTAKER R H. Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California [J]. *Ecological Monographs*, 1960, 30(3): 279-338.
- [12] 郭正刚, 梁天刚, 刘兴元, 等. 新疆阿勒泰地区草地类型及植物多样性的研究[J]. *西北植物学报*, 2003, 23(10): 1719-1724.
- [13] 季媛. 老秃顶子北坡植物群落类型及草本层物种多样性研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2008.
- [14] RAHBEK C. The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns [J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(2): 224-239.
- [15] WANG Z H, TANG Z Y, FANG J Y. Altitudinal patterns of seed plant richness in the Gaoligong Mountains, south-east Tibet, China [J]. *Diversity and Distributions*, 2007, 13(6): 845-854.
- [16] 沈永平, 王国亚, 苏宏超, 等. 新疆阿尔泰山区克兰河上游水文过程对气候变暖的响应[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(6): 845-854.
- [17] 席小康, 朱仲元, 周大正, 等. 锡林河流域草原植物群落多样性沿海拔梯度变化特征[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, 29(6): 17-21.

- [18] 谢春平, 王森, 伊贤贵, 等. 南京仙林地区安置小区木本植物组成与多样性分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(1): 64-67.
- [19] 鲁延芳, 占玉芳, 钱万建, 等. 河西走廊中部人工沙漠植被典型群落物种的多样性[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(4): 14-18.
- [20] MAGURRAN A E. Ecological diversity and its measurement [J]. *Biometrics*, 1988, 46(2): 81-99.
- [21] 李新荣, 张景光, 刘立超, 等. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 257-261.
- [22] 吕春花. 黄土高原子午岭地区土壤质量对植被恢复过程的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [23] 井学辉, 臧润国, 丁易, 等. 新疆阿尔泰山小东沟北坡植物多样性沿海拔梯度分布格局[J]. *林业科学*, 2010, 46(1): 23-28.
- [24] 吴晓慧, 单熙凯, 董世魁, 等. 基于改进的 Lotka-Volterra 种间竞争模型预测退化高寒草地人工恢复演替结果[J]. *生态学报*, 2019, 39(9): 3187-3198.