

波式潜流人工湿地处理景观水体的研究

赵楠, 刘志强, 李园芳, 靳雪皎, 葛学伟

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 以华北某市开发区波式潜流人工湿地(W-SFCW)中试系统为研究对象, 研究其处理环卫河景观水体的效果。在 4 个多月的连续运行期中, 对 COD, TN 和 TP 等指标进行监测。监测结果表明, W-SFCW 对化学需氧量(COD), TN 和 TP 的去除率分别达到 32.45%, 43.35% 和 39.24%, 其中 TN 和 TP 的平均出水浓度达到《地表水环境质量标准(GB3838—2002)》中Ⅳ类水标准。并用单因素方差分析对比了春、夏、秋 3 个季节下 W-SFCW 处理景观水体的效果, 发现季节的变化对 TN 和 COD 的去除影响显著, 对 TP 的去除影响不明显。提出了保障 W-SFCW 稳定运行的措施, 为 W-SFCW 在修复景观水体水质上的应用以及实际工程中的维护管理提供依据。

关键词: 波式潜流人工湿地; 景观水体; 处理效果

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)02-0130-05

中图分类号: X52, X703

Treatment of Scenic Water by Wavy Subsurface Flow Constructed Wetland

ZHAO Nan, LIU Zhi-qiang, LI Yuan-fang, JIN Xue-jiao, GE Xue-wei

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The wavy subsurface flow constructed wetland(W-SFCW) pilot system in a development zone in Northern China was selected as the researching object to discuss the treatment effects on the scenic water of the river. Parameters including COD, TN and TP were monitored during a continuous operational period of more than 4 months. The results showed that the removal efficiency of COD, TN and TP achieved 32.45%, 43.35% and 39.24% respectively. The average effluent concentrations of TN and TP met the class IV of surface water environmental quality regulation(GB3838—2002). By comparing the different effects in spring, summer and autumn using single factor analysis of variance, it was found that seasonal variations affected the removal of COD and TN significantly, but the influence on TP removal was minimal. Based on these findings, some measures were proposed to insure the stable operation of W-SFCW, which provides the foundation for the application of W-SFCW to restoring scenic water and the maintenance in management and engineering.

Keywords: wavy subsurface flow constructed wetland; scenic water; treatment efficiency

城市景观水体多为近于封闭的静止或缓流水体, 具有水域面积小、易受污染、水环境容量小、水体自净能力低等特点, 加上生活污水、工业污水和地表径流的注入, 极易造成水体富营养化, 严重影响水体生态和周围环境^[1]。因此, 寻找保持景观水体水质的措施势在必行。相对于传统处理技术, 人工湿地具有处理效果好、建设与运行费用低、改善和美化生态环境、易于维护和管理等优点, 是较理想的修复景观水体水质的技术^[2-4]。

波式潜流人工湿地(wavy subsurface flow constructed wetland, W-SFCW)是一种新型的人工湿

地。它结合了水平潜流(SFCW)和垂直潜流人工湿地的优点, 对氮、磷和有机物有较好的去除效果。国内已有一些学者对其进行了研究, 何成达^[5]等分析认为, W-SFCW 内的导流设施促进水流成波形流动, 使污染物多次经历湿地的上部和下部, 有效地发挥了湿地降解污染物的潜力。楚伟伟^[6]等研究表明, 在相同的水力负荷下, W-SFCW 对 COD, TN, NH₄⁺-N 和 TP 的去除率分别比 SFCW 提高了 10%, 17.2%, 11.6% 和 27.4%。然而, 针对 W-SFCW 修复景观水体水质的研究相对较少, 对 W-SFCW 长期运行效果的动态监测也相对缺乏。

收稿日期: 2012-04-11

修回日期: 2012-05-25

资助项目: 天津市科技创新专项“生态校园水资源综合利用成套技术示范工程”(08FDZDSF03200)

作者简介: 赵楠(1988—), 男(汉族), 湖北省潜江市人, 硕士研究生, 研究方向为人工湿地修复景观水体。E-mail: zhaonperfect@163.com。

通信作者: 刘志强(1959—), 男(汉族), 天津市人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为水处理技术的研究与应用。E-mail: lzq@tju.edu.cn。

以华北某市开发区的 W-SFCW 中试系统为研究对象,对该系统处理景观水体的效果进行动态监测。并且在前人研究的基础上,进一步探讨了 W-SFCW 去除污染物的机制,对比了不同季节下该系统去除污染物的效果,提出了保持该系统高效稳定运行的途径。以期为 W-SFCW 在修复景观水体水质的应用以及实际工程中的维护管理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本研究的 W-SFCW 中试系统位于该开发区环卫河边,其平面图如图 1 所示。河道中的水经水泵提升进入调节池,在调节池中进行曝气,增氧并去除异味。之后进入人工湿地处理系统,经湿地处理后的河水由跌水出水口回流河道。湿地连续运行,处理水量为 $500 \text{ m}^3/\text{d}$,布水管为直径 200 mm 的 PVC 管,湿地进水和出水的流量由设于进水口和出水口的阀门控制。

该中试系统包括 4 个处理单元,其中 1 号和 2 号串联,3 号和 4 号串联,2 组池子相互并联。根据该市的气候条件选择对氮、磷等污染物吸收能力较强,耐水浸泡且抗污能力强,且根系发达、生长周期长、生物产量大的植物进行种植。因此在湿地处理系统的 1 和 2 号池子中种植黑山稜,种植密度为 $10 \text{ 株}/\text{m}^2$,3 和 4 号池子中分别种植黄花鸢尾和香蒲,种植密度为 $15 \text{ 株}/\text{m}^2$ 。每个池子均设置一个竖井取样口,方便进行取样测试。

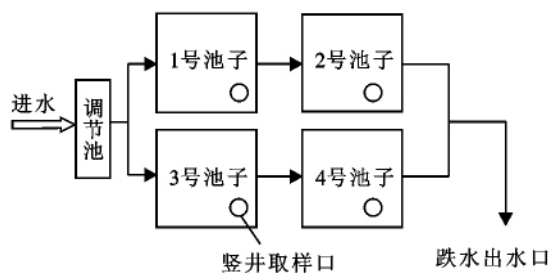


图 1 试验区平面示意图

每个处理单元皆为一个独立的 W-SFCW 系统(图 2),在湿地内部规则地设置导流板,使水呈波形流态,在垂直方向上多次经过湿地内部具有不同处理特性的构造层。处理单元的尺寸相同,长、宽、高分别为 15,15 和 1.5 m。内部填充不同深度的页岩和大粒径砾石作为基质,底部承托层为大粒径砾石,粒径为 7~8 cm,填充高度为 40 cm,砾石上面填充页岩作为主填料层,填充高度为 60 cm,为防止管道堵塞,在页岩上面填充 20 cm 的大粒径砾石。

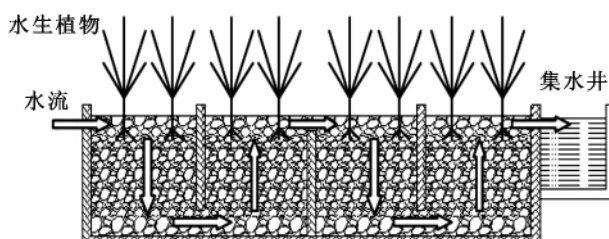


图 2 试验区 W-SFCW 示意图

1.2 进水水质

湿地进水来自环卫河道,试验在春夏两季进行,雨水比较丰富,而降雨期间,受地表径流影响,进水水质变化较大。各项水质指标极值及均值详见表 1。

表 1 试验区 W-SFCW 进水水质

水质参数	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值	温度/ $^{\circ}\text{C}$
最大值	98	4.29	0.82	8.17	33.7
最小值	49	1.72	0.16	7.24	9.2
平均值	76	2.62	0.42		
标准差	12.6	0.75	0.35		

1.3 试验方法

试验从 2011 年 5 月上旬至 2011 年 9 月下旬,每隔 2 d 取 1 次样,这期间,气温变化约为 $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

试验的进水水样取自调节池,每个处理单元的水样取自各个池子中的竖井取样口,出水水样取自跌水出水口,每次取样约 300 ml。主要的监测指标包括 TP, TN, COD 以及 pH 值。其中 TP 和 TN 按照《水和废水监测分析方法(第四版)》所规定的方法进行检测^[7], COD 采用微波快速消解法进行检测, pH 用 HS-25 型酸度计进行测定。

2. 结果与讨论

2.1 W-SFCW 对有机物(COD)去除效率的动态特征

有机物是景观水体的主要污染物之一。由图 3 可以看出, W-SFCW 对 COD 有一定的去除效果,其进水和出水的平均 COD 浓度分别为 76 和 $51 \text{ mg}/\text{L}$, COD 平均去除率达到了 32.45%。一方面可溶性有机物通过人工湿地中植物的吸收、植物根系生物膜的吸附和微生物的代谢所去除。何成达等^[5]研究发现,不同的湿地系统在垂直方向上有机物降解的机理有较大差别,整体上湿地系统从表面到底层由好氧向兼氧—厌氧过渡。而 W-SFCW 内的导流设施促进水流呈波形流动,使污染物数次经历使得的上部及底部,有效地发挥了湿地降解污染物的潜力。另一方面,不溶性有机物通过湿地基质的截留、沉淀和过滤

作用去除^[8]。由于 W-SFCW 的特殊结构,使污水不断进行上行流、下行流的交替,与页岩层和砾石层反复接触,更加显著地促进了基质的截留沉淀作用^[6]。

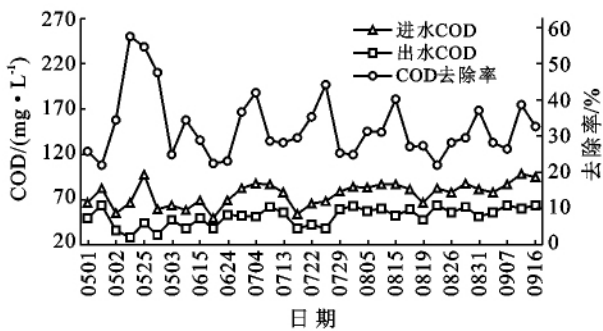


图 3 试验区人工湿地对 COD 去除效率的动态特征

在湿地运行初期,由于湿地管理问题,导致湿地去有机物的去除率波动较大。在 5 月 23 日,由于水泵不能正常工作,进水量减少,水位下降,湿地的水力停留时间(HRT)增加,但 COD 的去除率却由 20%~30%提高到了 57.6%。可以看出,减少进水量,增加 HRT 能使出水水质改善,这与张永祥等^[9]的试验结果一致。但也有文献^[10]显示,HRT 过长会导致营养物质尤其碳源不足,而且会使系统呈厌氧状态,影响微生物的活性。另一方面,这样(保持 HRT 过长)的运行效率很低,日处理水量少,经济性不高。实际运行中可以适当结合不同工况,控制进水量,以达到最佳效果。

2.2 W-SFCW 对 TN 去除效率的动态特征

人工湿地中氮的去除主要是通过微生物的氨化、硝化和反硝化作用。植物的吸收、氮的挥发作用以及基质的吸附也会对 TN 的去除起到一定的作用^[11]。Spieles 等^[12]研究表明,人工湿地系统中,反硝化作用脱除的氮占总去除氮的比例高达 60%~70%。刘晓娜等^[13]用 MATLAB 编程模拟湿地中氮素的迁移转化过程,模拟出 TN 的去除率为 60.53%,其中反硝化过程去除了 43.10%,植物吸收去除了 13.98%,沉淀去除了 3.45%(图 4)。

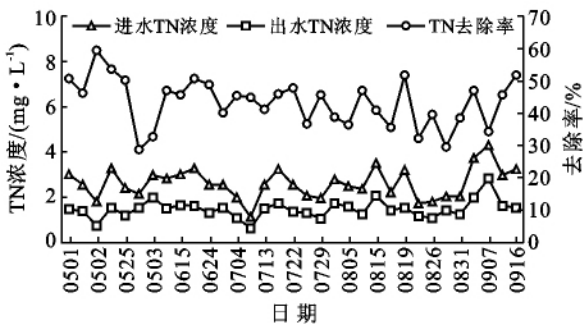


图 4 试验区人工湿地对 TN 去除效率的动态特征

由图 4 的监测结果可以看出,湿地进水和出水的平均 TN 浓度为 2.62 和 1.48 mg/L,平均去除率达到 43.35%。经初步分析认为,W-SFCW 的波形流态使水流在床体内依次土壤层、砾石层交替流动,使 W-SFCW 更好地吸收氮;另一方面,W-SFCW 内部的污水反复进行好氧—兼氧—厌氧状态,是典型的 A/O 工艺,使 W-SFCW 具有更好的除氮性能。

在湿地运行初期,TN 的去除率变化较大,5 月 20 日达到了 59.5%,而 5 月 27 日只有 28.7%。这主要由于运行初期湿地植物都处在生长期,湿地系统未达到稳定运行状态,TN 去除率波动较大。6—8 月湿地植物生长茂盛,并且夏季水温十分适合微生物的生长,保证了吸附在基质和植物根系上的微生物的健康生长,形成了一个完整的“基质—微生物—植物”的生态系统^[14],对 TN 的吸收作用明显,TN 去除率相对稳定,均达到了 40%以上。

2.3 W-SFCW 对 TP 去除效率的动态特征

磷是景观水体富营养化的主要诱导因素之一。其在人工湿地中的去除主要依靠 3 方面作用:基质的物理化学作用,植物的吸收作用及聚磷菌的过量摄磷作用。其中基质的吸附起主导作用^[15]。Sakadevan 等^[16]以土壤、沸石、鼓风炉渣和钢炉渣为人工湿地填料进行了吸附磷试验,发现鼓风炉渣的除磷效果最好,最大吸磷量为 44.20 mg/g,超过土壤吸磷量 40 倍(图 5)。

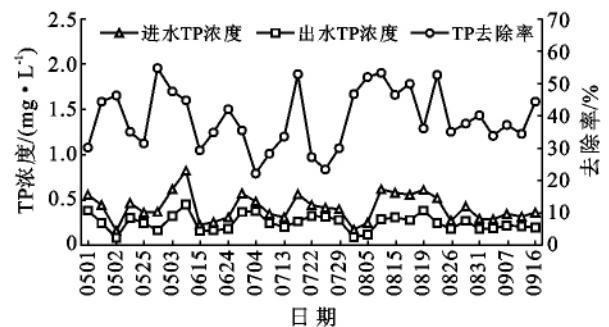


图 5 研究区人工湿地对 TP 去除效率的动态特征

由图 5 可以看出,W-SFCW 对 TP 有较好的去除效果,TP 平均进水和出水浓度为 0.42 和 0.25 mg/L,TP 的平均去除率达到了 39.24%。蔡树美等^[17]人研究表明,由于 W-SFCW 中隔板的强制作用,水流路径发生明显变化,使中、下各层的土壤可以更多地接触被处理污染水体,从而为吸附、固定更多的磷创造了条件。但是进入 9 月份以来,由于天气转凉,湿地植物开始枯萎,腐烂的植物使已被植物吸收的磷重新释放到水中,造成出水中 TP 的含量明显增加。所以应定期对植物进行收割,避免二次污染。

2.4 不同季节下 W-SFCW 运行效果对比

植物是人工湿地的重要组成部分,Chung 等^[18]研究表明,除了对氮的直接吸收、供养、提供微生物生存的场所外,湿地中植物的存在一定程度上提供了反硝化所需的有机物,从而间接改善脱氮效果。而植物的生长状况四季不同,所以研究季节的变化对 W-SFCW 处理效果的影响具有十分重要的意义。由于北方冬天水面结冰, W-SFCW 系统处于停运状态,所以本研究只比较了春、夏、秋季节该系统的处理效果,表 2 为试验结果。采用 SPSS 18.0 对试验结果进行了单因素方差分析,计算结果详见表 3。

表 2 3 种季节下 W-SFCW 运行效果 %

季节	样本数	COD 去除率	TN 去除率	TP 去除率
春	12	31.30±9.46	41.99±6.03	41.47±7.81
夏	12	36.18±3.62	44.23±3.18	40.64±9.12
秋	12	29.25±3.75	38.41±2.48	38.93±3.98

注:表中结果为所有样本的平均值,表述为平均值±标准差。

表 3 W-SFCW 处理效果的方差分析

项目	离差平方和	自由度	均方	F 值	显著性 (p 值)
COD 去除率	290.02	2	145.01	3.504	0.043
TN 去除率	174.35	2	87.17	4.664	0.017
TP 去除率	33.53	2	16.72	0.293	0.748

试验结果表明,季节的变化对 COD 和 TN 的去除效果影响显著 ($p < 0.05$)。这与崔芳^[19]的研究结果一致,其研究发现秋季湿地对 COD 的去除率比冬季高 19.58%,对 TN 的去除率比冬季高 33.79%。从表 3 可以看出,夏季时 W-SFCW 对 COD 和 TN 的平均去除率高于春秋两季,主要由于春季时植物刚刚种下,还处在适应期,且床体内部的基质上没有形成有效的生物膜,导致了湿地系统的处理效果不理想,去除率波动较大。夏季时,湿地系统内植物长势良好,水温升高,促进了湿地内部微生物的生长,填料表面和植物根系上形成了较为稳定的生物膜,使 W-SFCW 对有机物和氮的去除效率较高。到了秋季,由于气温降低,湿地植物开始枯萎,微生物的活性降低,湿地去除污染物效率降低。

而季节的变化对 TP 去除率的影响不明显 ($p > 0.05$)。原因在于湿地对 TP 的去除主要依靠基质的吸附和沉降,植物吸收的磷很少,有文献报道^[20]植物吸收的磷仅占总磷去除量的 1%~3%。从表 2 可以看出,春季时 W-SFCW 对 TP 的去除率较高,这是由于春季湿地刚运行时,内部污染物较少,对磷的吸附效果较好。到了夏秋两季,湿地内基质吸附量已达到

了一定的饱和度,对磷的去除能力减弱。

因此为了使 W-SFCW 高效稳定的运行,应在不同季节采用不同的运行方式。春秋两季时, W-SFCW 对污染物的去除能力较差,应采用低水力负荷水平运行,加大水力停留时间,以达到更好的去除效果。夏季可以采用高水力负荷水平运行,适当减少水力停留时间。这与王培京等人^[21]的研究结果一致,其研究表明夏季高温采用高水力负荷 (0.12~0.15 m/d)、秋季采用中水力负荷 (0.07~0.10 m/d)、冬季采用低水力负荷 (0.04~0.06 m/d) 能达到最佳的运行效果。

3 结论

(1) W-SFCW 对 COD, TN 和 TP 的去除效果较好,去除率分别达到了 32.45%, 43.35% 和 39.24%, 其中 TN 和 TP 的平均出水浓度达到了《地表水环境质量标准 (GB3838—2002)》Ⅳ类水质标准。说明利用 W-SFCW 修复景观水体水质是可行的,为探索保持景观水体水质的措施提供了一些依据。

(2) 季节变化对 W-SFCW 系统的 COD 和 TN 的去除效果影响显著,对 TP 的去除效果影响不明显。在不同的季节下, W-SFCW 应采用相应的运行方式,春秋两季时, W-SFCW 对污染物的去除能力较差,宜采用低水力负荷水平运行,加大水力停留时间。夏季则应采用高水力负荷水平运行,适当减少水力停留时间。并且应定期对植物进行收割。

(3) 本实验只是初步的验证性试验,应对 W-SFCW 内部微生物的生长状况、湿地植物密度对去除率的影响等作进一步的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 张琼华,吉倩倩,王晓昌,等.城市景观水体水质净化的人工湿地设计[J].环境工程学报,2009,3(11):1965-1968.
- [3] Chrisc T. Treatment of dairy farm wastewater in horizontal and up-flow gravel-bed constructed wetland[J]. Water Science and Technology, 1994, 29(4):85-93.
- [4] Long M N. Organic matter composition, microbial biomass and microbial activity in gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters[J]. Ecological Engineering, 2000, 16(2):199-221.
- [5] 何成达,谈玲,葛丽英,等.波式潜流人工湿地处理生活污水的试验研究[J].农业环境科学学报,2004,23(4):766-769.
- [6] 楚伟伟,王克科,王岩石.波形潜流人工湿地的应用研究[J].水处理技术,2011,37(4):91-94.

- [7] 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: 272-323.
- [8] 于水利, 修春梅, 杨月杰. 人工湿地机制对微污染原水中有机物的去除效果[J]. 中国给水排水, 2011, 27(3): 56-58.
- [9] 张永祥, 闫峰, 袁崇刚, 等. 潜流型人工湿地水力条件的研究[J]. 给水排水, 2011, 37(S): 66-69.
- [10] 朱文玲, 郑离妮, 崔理华, 等. 不同碳氮比条件下 4 种可控因素对垂直流人工湿地总氮去除的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1187-1192.
- [11] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 123-124.
- [12] Spieles D J, Mitsch W J. The effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2000, 14(1/2): 77-91.
- [13] 刘晓娜, 丁爱中, 程荭蓉, 等. 潜流人工湿地除氮的生态动力学模拟[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 166-170.
- [14] Reddy K R, Angelo E M. Biogeochemical indicators to evaluate pollutant removal efficiency in constructed wetlands[J]. Water Science and Technology, 1997, 35(5): 1-10.
- [15] 王荣, 贺峰, 徐栋, 等. 人工湿地基质除磷机理及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6): 12-18.
- [16] Sakadeven K, Bavorh J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1998, 32(2): 393-399.
- [17] 蔡树美, 王娟娟, 蔡玉琪, 等. 波式潜流人工湿地对生活污水中磷的去除效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1484-1487.
- [18] Chung A K, Wu Y. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater[J]. Ecological Engineering, 2008, 32(1/3): 81-89.
- [19] 崔芳. 季节变化对人工湿地净化城市湖泊水体的影响[J]. 人民黄河, 2011, 33(7): 79-80.
- [20] 钟成华, 李杰, 邓春光. 人工湿地废水处理中氮、磷去除机理研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(4): 141-146.
- [21] 王培京, 葛鹏, 廖日红. 水平潜流人工湿地处理北方低浓度生活污水研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(35): 22000-22002.

(上接第 129 页)

- [3] 王鹏, 陈丽华, 卞西陈, 等. 北沟林场天然次生林群落结构与种群分布格局[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1668-1674.
- [4] 郝占庆, 陶大立, 赵士洞. 长白山北坡阔叶红松林及其次生白桦林高等植物物种多样性比较[J]. 应用生态学报, 1994, 5(1): 16-23.
- [5] 马克平. 生物群落多样性的测度方法: I. α 多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.
- [6] Mangurran A E. Ecological Diversity and Its Measurement [M]. Princeton: Princeton University Press, 1988.
- [7] 张峰, 上官铁梁. 山西绵山森林植被的多样性分析[J]. 植物生态学报, 1998, 22(5): 461-465.
- [8] 岳永杰, 余新晓, 牛丽丽, 等. 北京雾灵山植物群落结构及物种多样性特征[J]. 北京林业大学学报, 2008, (S2): 165-170.
- [9] 谢晋阳, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林的物种多样性特征[J]. 生态学报, 1994, 14(4): 337-344.
- [10] 高贤明, 黄建辉, 万师强, 等. 秦岭太白山弃耕地植物群落演替的生态学研究: II. 演替系列的群落 α 多样性特征[J]. 生态学报, 1997, 17(6): 619-625.
- [11] 高宝嘉, 张执中, 李镇宇. 封山育林对植物群落结构及多样性的影响[J]. 北京林业大学学报, 1992, 14(2): 46-53.
- [12] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980
- [13] 万五星, 王德艺, 河万红. 雾灵山自然保护区亚高山草甸植物群落结构研究[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2006, 26(6): 619-624.
- [14] 李利平, 崔国发. 北京雾灵山自然保护区植物数量评价[J]. 林业调查规划, 2005, 30(2): 45-49.
- [15] 史作民, 程瑞梅, 刘世荣, 等. 宝天曼植物群落物种多样性研究[J]. 林业科学, 2002, 38(6): 17-23.