

森林和沼泽对溪流水化学特征的影响*

满秀玲 范金凤 谭晓京 蔡体久**

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

【摘要】以小兴安岭北部公别拉河上游为研究区,于2004年7~9月对森林溪流和沼泽溪流水样进行水化学特征对比分析.结果表明,森林和沼泽溪流水化学类型均为重碳酸盐类钙组I型水(C_1^{Ca}).森林溪流水的pH、矿化度、总硬度、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、Fe均低于沼泽溪流,而总氮、总磷、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 则高于沼泽溪流.森林溪流和沼泽溪流中重金属元素Fe、Mn、Cu、Zn、Cd、Hg和Pb含量较低,均未超过我国I类地表水环境质量标准.森林溪流中总氮含量为(0.27 ± 0.04) $mg \cdot L^{-1}$ 、总磷含量为(0.040 ± 0.005) $mg \cdot L^{-1}$,明显高于沼泽溪流中总氮含量((0.21 ± 0.02) $mg \cdot L^{-1}$)和总磷含量((0.025 ± 0.004) $mg \cdot L^{-1}$),沼泽湿地对N、P有较強的储存和吸附能力,且对 NH_4^+-N 的吸附作用远大于对 $NO_3^- -N$ 的吸附.沼泽溪流中Fe含量为(0.26 ± 0.05) $mg \cdot L^{-1}$,显著高于森林溪流Fe含量,沼泽湿地对Fe有还原释放作用.

关键词 公别拉河流域 森林 沼泽 溪流 水化学特征

文章编号 1001-9332(2006)06-0992-05 中图分类号 S715.3; X132 文献标识码 A

Effects of forest and swamp on hydrochemical characteristics of streams. MAN Xiuling, FAN Jinfeng, TAN Xiaojing, CAI Tijiu (School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(6): 992~996.

With the upper reaches of Gongbiela River in the northeast part of Xiaoxing' an Mountains as test area, this paper studied the hydrochemical characteristics of the streams in forest and swamp during the period of June ~ September 2004. The results indicated that the hydrochemistry of forest and swamp streams belonged to calcium-bicarbonate type I (C_1^{Ca}). The pH value, mineralization rate, total hardness, and HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Fe concentrations of forest streams were lower than those of swamp streams, while the concentrations of total N, total P, Cl^- , K^+ , and Na^+ were in adverse. In both of the streams, the contents of heavy metal elements such as Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Hg and Pb were lower than the class I in Environmental Quality Standards for Surface Water (EQSSW) of China. The concentrations of total N and P in forest streams were (0.27 ± 0.04) $mg \cdot L^{-1}$ and (0.040 ± 0.005) $mg \cdot L^{-1}$, respectively, being significantly higher than those ((0.21 ± 0.02) $mg \cdot L^{-1}$ and (0.025 ± 0.004) $mg \cdot L^{-1}$) in swamp streams. Swamp wetland had a stronger ability in depositing and adsorbing N and P, with more NH_4^+-N adsorbed than $NO_3^- -N$, and also had a stronger ability on the reduction and release of Fe, with the Fe content ((0.26 ± 0.05) $mg \cdot L^{-1}$) in its streams obviously higher than that in forest streams.

Key words Gongbiela River basin, Forest, Swamp, Stream, Hydrochemical characteristics.

1 引言

公别拉河流域位于黑龙江省小兴安岭北部,分布着大面积的森林和沼泽.由于近年来对自然资源的开发和利用,致使大面积的森林和沼泽遭到破坏,对公别拉河水质产生很大影响.森林和沼泽对水质具有净化作用.随着水分在生态系统进入和输出水中,污染物被生物和土壤吸收、分解或固定,使其种类和数量减少^[1, 12, 16, 18].尤其是作为一个特殊生态系统——沼泽,在滞留沉积物、降解污染物和净化水质等方面具有特殊功能^[2, 8, 23, 25, 27],被称为“地球之肾”.国内外关于森林或沼泽对水化学性质影响的研究报道较多^[6, 11, 24, 26, 28, 30],而同一地区森林和沼泽对不同化学组成物质的净化程度和作用

方式对比研究较少.因此,本文选择公别拉河上游人为干扰较少、自然植被保存完好区段,进行森林和沼泽对河流水化学特征影响的对比研究,探知同一地区森林与沼泽对水质影响的差异,旨在为该区的植被恢复和水资源管理提供科学依据.

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

公别拉河流域(126°30'~127°30'E, 49°40'~50°10'N)位于黑河市西南部,是黑龙江的一级支流,流域面积2 750 km^2 ,河流全长147 km.该区属寒温带季风气候,受太平洋季

* 国家自然科学基金项目(30471424)和黑龙江省科技攻关资助项目(GC04B608).

** 通讯联系人. E-mail: caitj@263.net
2006-02-15 收稿, 2006-04-25 接受.

风及西伯利亚高压影响, 夏季多雨而短暂, 冬季寒冷而漫长, 年均降水量 551.6 mm, 年均气温 $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本区河流密集, 河谷宽阔深长, 河谷漫滩发育完好, 滩面宽 300~1 400 m, 形成大面积沼泽湿地。本研究区自然景观由森林景观和湿地景观两部分构成。其森林植被以阔叶树种为主, 针叶树种种类较少, 主要树种有白桦 (*Betula platyphylla*)、黑桦 (*B. dahurica*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、山杨 (*Populus davidiana*) 和兴安落叶松 (*Larix gmelini*); 沼泽类型比较丰富, 有森林沼泽、灌木沼泽和草本沼泽, 其中灌木沼泽和草本沼泽所占比例较大, 主要物种有柴桦 (*B. fruticosa*)、细叶沼柳 (*Salix rosmarinifolia*)、五蕊柳 (*S. pentandra*)、笃斯越桔 (*Vaccinium uliginosum*)、修氏苔草 (*Carex schmidtii*) 和丛苔草 (*C. caespitosa*) 等。

2.2 研究方法

在公别拉河上游选择 3 个相邻集水区, 各集水区自然条件相似, 近 70% 为森林, 其它为沼泽湿地。集水区上游森林溪流流经低洼处沼泽湿地后, 汇入公别拉河。在 3 个集水区中选择 3 个森林溪流采样点 (记为 F_1 、 F_2 、 F_3), 再选择与森林溪流相对应 3 个沼泽溪流采样点 (记为 S_1 、 S_2 、 S_3), 于 2004 年 7~9 月进行水样采集, 每月取样 1 次, 3 次重复, 现场分别进行硝酸和乙酸处理, 将水样 pH 值调至 2 以下, 同时采集自然水样, 并立即送至市水文局水质监测中心进行水化学分析。各水样主要测定: pH 值、矿化度、总硬度、主要阴离子 (Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-})、主要阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+)、重金属元素 (Fe、Cu、Mn、Zn、Cd、Pb、Hg)、总氮和总磷。水化学分析采用国家标准 (GB5749-85)。总硬度、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 及 Ca、Mg 均采用滴定法测定; pH 值采用 Quanta 型分析仪测定; 矿化度采用 TG328A 型分析天平测定; 总氮、总磷采用 721 型分光光度计测定; K、Na、Fe、Cu、Mn、Zn、Cd 采用 WFX-130 型原子吸收分光光度计测定; Pb 采用原子荧光光度计测定; Hg 采用 ZYG-II 型原子荧光测汞仪测定。

利用 STATISTICA 统计软件, 将所获数据项进行统计分析, 得出每一项目平均值、标准差及森林和溪流之间各项目差异显著性, 然后利用各项平均值进行比较分析。

3 结果与分析

3.1 森林溪流和沼泽溪流主要离子与水化学类型

由表 1 可以看出, 森林和沼泽溪流中阴离子以 HCO_3^- 为主, 占阴离子总量的 83.15%~90.25%; 阳离子以 Ca^{2+} 为主, 占阳离子总量的 70.32%~

73.78%, 其它离子所占比例均较小。按水体中阴、阳离子优势成分和阴、阳离子间比例关系, 本区溪流的水化学类型确定为重碳酸盐类钙组 I 型水, 表示为 C_1^{Ca} 。森林溪流和沼泽溪流主要阴离子含量排序均为: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$, 主要阳离子含量排序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ 。

森林溪流和沼泽溪流 pH 值为中性, 矿化度和总硬度也较低, 属优质水范围^[7]。沼泽溪流 pH 值为 7.18 ± 0.1 , 矿化度为 $(113.2 \pm 10.3) \text{ mg L}^{-1}$, 总硬度为 $(45.2 \pm 4.3) \text{ mg L}^{-1}$, 均高于森林溪流。与森林溪流相比, 沼泽溪流中 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 相对增加, 其中 SO_4^{2-} 增加达极显著水平 ($P < 0.01$), HCO_3^- 和 Ca^{2+} 达显著水平 ($P < 0.05$), Mg^{2+} 增加不显著 ($P > 0.05$); 而 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 相对减少, 其中 K^+ 达极显著水平 ($P < 0.01$), Cl^- 、 Na^+ 减少不显著 ($P > 0.05$)。沼泽溪流中 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量高于森林溪流, 说明本区沼泽土壤酸化作用较强, 因沼泽土壤长期酸化, 同时沼泽植物根系呼吸产生的 CO_2 , 使土壤中难溶水的 CaCO_3 转化为可溶于水 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, 即: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, 从而使沼泽溪流中 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 含量升高。阳离子被土壤吸附能力大小顺序为: $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, 土壤对 Na^+ 具有较强吸附作用, 当水与土壤长期接触时, 由于吸附离子的交换作用而使水中化学成分发生改变, 致使沼泽溪流中 Na^+ 、 K^+ 含量小于森林溪流。

3.2 森林溪流与沼泽溪流中 N、P 含量

由图 1 可以看出, 森林溪流中总氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N}$) 含量为 $(0.27 \pm 0.04) \text{ mg L}^{-1}$ 、总磷含量为 $(0.040 \pm 0.005) \text{ mg L}^{-1}$; 而沼泽溪流中总氮含量为 $(0.21 \pm 0.02) \text{ mg L}^{-1}$ 、总磷含量为 $(0.025 \pm 0.004) \text{ mg L}^{-1}$, 均小于森林溪流。由此说明, 沼泽湿地对 N、P 有较强储存和吸附能力, 可以起到净化水中 N、P 的作用^[19, 29]。与未受干扰的温带森林溪流中总氮和总磷相比^[21], 本区森林溪流总氮、总磷含量较高; 而与张广才岭西段阿什河流域森林溪流相比, 则显著变小^[15]。

表 1 森林溪流和沼泽溪流中主要离子含量*

Table 1 Main ion contents in the streams through forest and swamp (mg L^{-1})

采样点 Sampling plots	pH	矿化度 Mineralization	总硬度 Total hardness	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
森林溪流 Forest stream	7.14 ± 0.1	107.2 ± 11.3	34.7 ± 1.5	48.71 ± 2.68	1.08 ± 0.14	4.18 ± 0.34	0.96 ± 0.07	1.30 ± 0.35	10.21 ± 0.38	2.05 ± 0.16
沼泽溪流 Swamp stream	7.18 ± 0.1	113.2 ± 10.3	45.2 ± 4.3	60.61 ± 3.16	1.01 ± 0.08	11.27 ± 3.62	0.74 ± 0.06	1.13 ± 0.10	13.06 ± 0.66	2.82 ± 0.37

* 平均值 \pm 标准差 Mean \pm SD. 下同 The same below.

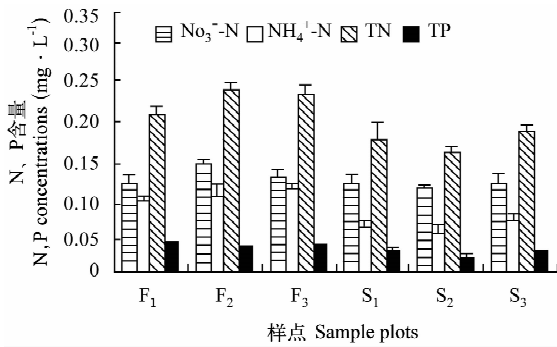


图1 森林和沼泽溪流中 N、P 含量
Fig.1 Contents of N and P in the streams through forest and swamp.

森林溪流中 NO₃⁻-N 含量为 (0.15 ± 0.04) mg·L⁻¹、沼泽溪流为 (0.14 ± 0.03) mg·L⁻¹，二者差异不显著 (P > 0.05)；而 NH₄⁺-N 含量森林溪流为 (0.12 ± 0.05) mg·L⁻¹、沼泽溪流为 (0.07 ± 0.04) mg·L⁻¹，二者差异显著 (P < 0.05)。沼泽溪流中 NO₃⁻-N 含量比森林溪流减少 7%，而 NH₄⁺-N 则减少 45%，说明沼泽湿地土壤对 NH₄⁺-N 的吸附作用远大于对 NO₃⁻-N 的吸附。NO₃⁻-N 不易被土壤吸附，容易随降雨、径流流失，从而使土壤溶液、地表水或地下水中 NO₃⁻-N 含量偏高^[3~5, 22]。

在淹水情况下，水中颗粒或土壤对 P 的吸附量增加，可溶性无机磷化合物容易与土壤中的 Al³⁺、Fe³⁺、Ca²⁺ 和 CaCO₃ 等发生沉淀和吸附反应^[10]。因此，进入沼泽湿地中的 P 主要留存于土壤中。土壤对 P 的储存能力与有机质含量有关，有机质含量愈高，对 P 的吸附能力愈强^[17]。本研究区河流两岸为大面积沼泽湿地，土壤剖面分析可知，这是由于多年洪水泛滥时冲积和淤积所致，土层深厚，含有大量有机质和泥炭，因此，对 P 的吸附和净化作用较强。溪流中 N:P 的大小可以反映这一生态

系统初级生产力限制因素，当 N:P < 16 时，受 N 限制^[20]。森林溪流中 N:P = 6~9、沼泽溪流中 N:P = 7~10，说明本区森林溪流和沼泽溪流中 N 是生物生长的限制因子。

3.3 森林溪流与沼泽溪流中重金属元素含量

森林溪流中 Fe 含量为 (0.10 ± 0.03) mg·L⁻¹、Mn 含量为 (0.066 ± 0.004) mg·L⁻¹ (表 2)，均小于国家饮用水标准 (Fe ≤ 0.3 mg·L⁻¹, Mn ≤ 0.1 mg·L⁻¹, GB5749-85)，其它微量元素含量也较小，Zn、Hg 没有检测到，说明本区森林溪流重金属含量较低，符合我国 I 类地表水质量标准 (GB3838-2002)。沼泽溪流中 Fe 含量为 (0.26 ± 0.05) mg·L⁻¹，Mn 为 (0.060 ± 0.005) mg·L⁻¹；Cu、Pb 含量很小，Zn、Cd、Hg 没有检测到。与森林溪流相比，沼泽溪流中 Fe 含量明显提高，是森林溪流的 2.6 倍，Mn 含量低于森林溪流，降幅为 9%。溪流中 Fe 含量与集水区土壤化学组成、径流条件及氧化还原环境密切相关。Fe 在氧化环境下主要以高价 Fe³⁺ 形式存在，并易形成难溶的氢氧化物沉淀，而在土壤还原条件下，Fe 被还原为 Fe²⁺，其溶解度增加。本区沼泽湿地表层滞水中 Fe 含量较高，在 0.27~3.96 mg·L⁻¹ 之间变化^[14]，增加了沼泽溪流中的 Fe 含量。因此，沼泽湿地对 Fe 有还原释放作用。

森林溪流和沼泽溪流中 Cu 含量较低，沼泽溪流比森林溪流减少 40%。公别拉河各区段河水中 Cu 含量也较低，均小于国家地表水环境质量 III 类水质标准 (0.01 mg·L⁻¹)。本区森林溪流、沼泽溪流及公别拉河各区段水中 Cd、Pb 含量均较少，Zn、Hg 未检测到。因此，公别拉河流域河水中 Cd、Pb、Zn、Hg 等重金属元素对黑龙江江水不会造成污染。

表 2 森林溪流与沼泽溪流及公别拉河河水中重金属元素含量
Table 2 Concentrations of heavy metals in the streams through forest and swamp and in Gongbiela River (mg·L⁻¹)

采样点 Sampling plots	Fe	Mn	Cu	Cd	Pb	
森林溪流 Forest stream	0.10 ± 0.03	0.066 ± 0.004	0.005 ± 0.002	0.001 ± 0.001	0.0016 ± 0.0005	
沼泽溪流 Swamp stream	0.26 ± 0.05	0.060 ± 0.005	0.003 ± 0.001	-	0.0017 ± 0.0004	
公别拉河 Gongbiela River	上游 Upper reaches	0.26 ± 0.03	0.063 ± 0.001	0.005 ± 0.000	0.002 ± 0.001	0.0021 ± 0.0002
	中游 Middle reaches	0.76 ± 0.03	0.157 ± 0.003	0.007 ± 0.001	-	0.0028 ± 0.0004
	下游 Lower reaches	0.67 ± 0.06	0.151 ± 0.005	0.006 ± 0.002	-	0.0012 ± 0.0002
平均 Average	0.60 ± 0.17	0.123 ± 0.027	0.006 ± 0.001	0.001 ± 0.001	0.0020 ± 0.0007	
黑龙江江水 Heilongjiang River	0.21 ± 0.02	0.093 ± 0.020	0.007 ± 0.001	-	0.0016 ± 0.0008	

4 讨论

张丹玲等^[13]测定，黑龙江黑河段江水 2002 年

总氮含量为 (2.37 ± 0.25) mg·L⁻¹，比 2001 年显著增加，说明黑龙江富营养化程度呈增加的趋势。黑龙江江水富营养化的原因之一是本区段上游各支流自

然资源的不合理开发和利用. 作为上游一级支流, 公别拉河, 其上游森林溪流和沼泽溪流中总氮含量较低, 均小于 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而其下游河水总氮含量为 $(0.76 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为富营养型. 因此, 恢复本流域原始森林和湿地植被是保护和防止黑龙江江水富营养化的有效途径之一.

尽管沼泽湿地对 Fe 有吸附作用, 但公别拉河上游河水中 Fe 含量较低, 为 $(0.26 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 没有超过国家饮用水标准. 公别拉河中游 Fe 含量则大幅增加, 达 $(0.76 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 下游为 $(0.67 \pm 0.06) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 处于严重超标状态. Mn 也是公别拉河河水中含量较高的微量元素, 仅次于 Fe. 在公别拉河上游河水中, Mn 含量仅为 $(0.063 \pm 0.001) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 中、下游区段河水中则均大于 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 造成公别拉河中、下游河水 Fe、Mn 含量增加的主要原因是公别拉河中、下游区段不合理土地利用, 森林和湿地的大面积开发和利用, 如采伐森林、修建大型水库、开垦农田、过度放牧、开采矿产和筑路等造成水土流失, 导致 Fe、Mn 等矿物元素大量汇入公别拉河. 公别拉河中游和下游建造了两座大型水库, 随着水库水深度的增加, 水体氧气浓度下降, 逐渐转变成还原状态, 从而导致沉积物中 Fe、Mn 的释放, 使其还原成可溶的低价态 Fe 和 Mn^{2+} , 增加了水中 Fe 和 Mn 的含量. 因此, 公别拉河流域中、下游不合理土地利用致使大量 Fe、Mn 输入黑龙江, 造成江水污染.

5 结 论

5.1 公别拉河流域上游森林溪流和沼泽溪流中阴离子以 HCO_3^- 为主、阳离子以 Ca^{2+} 为主, 其它离子所占比例均较小, 水化学类型为重碳酸盐类钙型 I 型水, 表示为 C_1^{Ca} . 森林溪流和沼泽溪流阴离子含量排序均为: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$ 、阳离子含量排序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. 森林溪流和沼泽溪流的 pH、矿化度、总硬度、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 均低于沼泽溪流, 而 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 则高于沼泽溪流.

5.2 森林溪流中总氮和总磷含量均高于沼泽溪流. 来自森林的溪流水, 再流经沼泽湿地后总氮降低 22.2%、总磷降低 37.5%. 其中沼泽土壤对 NH_4^+ 的吸附远大于对 NO_3^- 的吸附.

5.3 森林溪流和沼泽溪流中的 Fe、Mn、Cu、Cd 和 Pb 等含量均较小, Zn 和 Hg 没有检测到, 水质状况优良. 公别拉河流域中、下游河水中 Fe、Mn 含量严重超标, 对黑龙江有一定污染作用. 因此, 应对本

流域中、下游的土地利用状况进行调整, 恢复本流域原始森林和湿地自然景观, 减少自然植被的破坏和不合理开发和利用, 保护本区优良的水资源, 以防止其对黑龙江江水的污染.

参考文献

- Brechtel HM, Führer HW. 1994. Importance of forest hydrological 'benchmark catchments' in connection with the forest decline problem in Europe. *J Agric For Meteorol*, **72**: 81 ~ 89
- Cui L-H (崔理华), Zhu X-Z (朱夕珍), Luo S-M (骆世明), et al. 2003. Purification efficiency of vertical flow wetland system constructed by cinder and turf substrate on municipal wastewater. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **14**(4): 597 ~ 600 (in Chinese)
- Foster NW. 1989. Temporal variation in nitrate and nutrient actions in drainage waters from a deciduous forest. *J Environ Qual*, **18**: 238 ~ 244
- Hanson GC. 1994. Denitrification in riparian wetlands receiving high and low groundwater nitrate inputs. *J Environ Qual*, **23**: 917 ~ 922
- Hanson GC. 1994. Symptoms of nitrogen saturation in a riparian wetland. *Ecol Appl*, **4**: 750 ~ 756
- Hiite CD, Cheng SL. 1996. Spatial characterization of hydro-geochemistry within a constructed fen, Greene County, Ohio. *Ground Water*, **34**: 415 ~ 424
- Jiang H (蒋辉). 2003. Environmental Hydrochemistry. Beijing: Chemical Industry Press. 67 ~ 85 (in Chinese)
- Laderman AD, ed. 1987. Atlantic White Cedar Wetlands. Colorado: Westview Press. 211 ~ 214
- Lian J-W (连家伟), Duan H-L (段洪雷), Chang A-M (常爱敏), et al. 2002. Research on transformation rule of water quality of Xili Reservoir. *Chin Rural Water Hydrol (中国农村水利水电)*, (12): 40 ~ 42 (in Chinese)
- Liang W (梁威), Wu Z-B (吴振斌). 2000. Research progress in mechanism of using constructed wetlands to removal nitrogen and phosphorous in wastewater. *Environ Sci Trends (环境科学动态)*, (3): 32 ~ 37 (in Chinese)
- Liu J-X (刘菊秀), Zhang D-Q (张德强), Zhou G-Y (周国逸), et al. 2003. A preliminary study on the chemical properties of precipitation, throughfall, stemflow and surface runoff in major forest types at Dinghushan under acid deposition. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **14**(8): 1223 ~ 1228 (in Chinese)
- Liu X-Z (刘煊章), Tian D-L (田大伦), Zhou Z-H (周志华). 1995. Studies on the function for purifying water of Chinese fir plantation ecosystem. *Sci Silvae Sin (林业科学)*, **31**(3): 193 ~ 199 (in Chinese)
- Lu L (卢玲), Dong C-Z (董崇智), Zhao C-X (赵彩霞), et al. 2003. Physico-chemical characteristics of different water in Heilongjiang system. *J Fish Chin (水产学报)*, **27**(4): 364 ~ 370 (in Chinese)
- Man X-L (满秀玲), Cai T-J (蔡体久). 2005. Hydrochemical characteristics of three kinds of wetland in Gongbiela Basin. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **16**(7): 1335 ~ 1340 (in Chinese)
- Mu P (牟溥), Wang Q-C (王庆成), Hershey AE, et al. 2004. Land-use, stream order and stream water physical and chemical qualities. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **24**(7): 1486 ~ 1492 (in Chinese)
- Ouyang X-J (欧阳学军), Zhou G-Y (周国逸), Huang Z-L (黄忠良), et al. 2002. Analysis on runoff water quality in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecol Sin (生态学报)*, **22**(9): 1373 ~ 1379 (in Chinese)
- Pan J-H (潘继花), He Y (何岩), Deng W (邓伟), et al. 2004. Progress in the study on the function of wetland in removal phosphorus in water. *Ecol Environ (生态环境)*, **13**(1): 102 ~ 104 (in Chinese)
- Qin Z (秦钟), Zhou Z-D (周兆德). 2001. Sustainable utilization of forest and water resource. *Chin J Trop Agric (热带农业科*

- 学), (3): 49~55 (in Chinese)
- 19 Qu X-R (曲向荣), Jia H-Y (贾宏宇), Zhang H-R (张海荣), *et al.* 2000. Preliminary study on purification function of reed wetland for nutrients from land sources. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **11**(2): 270~272 (in Chinese)
- 20 Redfield AC, Ketchum BH, Richards FA. 1963. The Influence of Organisms on the Composition of Seawater. New York: Wiley Press. 26~77
- 21 Rezanika KM, Hershey AE. 2003. Examining primary producer-consumer interactions in a Lake Superior tributary using ^{15}N -tracer, grazer-reduction, and nutrient-bioassay experiments. *J North Am Benthol Soc*, **22**: 371~387
- 22 Simmons RC. 1992. Nitrate dynamics in riparian forests: Groundwater studies. *J Environ Qual*, **21**: 659~665
- 23 Tian Y-B (田应兵), Xiong M-B (熊明标). 2004. Water quality assessment of National Nature Reserve in Ruogai wetland. *J Hubei Agric Coll* (湖北农学院学报), **24**(3): 161~165 (in Chinese)
- 24 Toetz D. 1995. Water chemistry and periphyton in an Alpine wetland. *Hydrobiologia*, **312**: 93~105
- 25 Tompkins TM, Whipps WW, Manor LJ, *et al.* 1997. Wetland effects on hydrological and water quality characteristics of a mid-Michigan river system. In: Trettin CC, Grigal DF, Jurgensen MF, eds. Northern Forested Wetlands: Ecology and Management. Boca Raton, FL: CRC Press Inc. 273~285
- 26 Wang W-D (王为东), Wang D-L (王大力), Yin C-Q (尹澄清), *et al.* 2001. A study on the groundwater quality of the Baiyangdian wetland ecosystem. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **21**(6): 919~925 (in Chinese)
- 27 Wang Y-Y (王毅勇), Song C-C (宋长春). 2003. Characteristics of water circulation of marsh-wetland in the Sanjiang Plain. *J Northeast For Univ* (东北林业大学学报), **31**(3): 3~7 (in Chinese)
- 28 Yan W-J (晏维金), Yi C-Q (尹澄清), Sun P (孙濮), *et al.* 1999. Phosphorus and nitrogen and runoff losses from rice field wetland of Chaohu Lake. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **10**(3): 312~316 (in Chinese)
- 29 Yin C-Q (尹澄清), Lan Z-W (兰智文), Yan W-J (晏维金). 1995. Retention of allochthonous nutrients by ecotones of Baiyangdian Lake. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **6**(1): 76~80 (in Chinese)
- 30 Zhang Y (张芸), Lü X-G (吕宪国), Yang Q (杨青). 2005. Water hydrochemistry of typical wetland in Sanjiang Plain. *J Soil Water Conserv* (水土保持学报), **19**(1): 184~187 (in Chinese)

作者简介 满秀玲,女,1964年生,博士,副教授,主要从事湿地、水土保持等方面研究,发表论文20余篇。E-mail: mannefu@163.com

责任编辑 李凤[±]
