哈尔滨城市森林土壤对污水的净化能力

段文标 段文靖 陈立新* 沈海龙 韩冬荟 曲美学 Amadou Touré 张玉双
(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘 要 为探明城市森林不同林型土壤对污水净化能力,为水岸防护林的配置提供依据,选择哈尔滨市城市林业示范基地内代表性的3种人工林(蒙古栎、黄檗、水曲柳)为研究对象,将无植被生长的裸地作为对照,通过室内土柱模拟法,定期采集马家沟污水进行室内模拟浇灌,对土柱中淋滤液进行成分测定。结果表明:所选的3个林型对铵态氮的去除效果显著($P<0.05$),各林型土柱吸附的铵态氮量以及各林型与对照之间差异均不显著($P>0.05$);3个林型及对照土柱淋滤液中硝态氮量与未经土柱过滤的污水相比均极显著增加($P<0.01$),且滤出的硝态氮量随着进水量的增加而增加,3个林型土柱淋出的硝态氮量均低于对照,但差异并不显著($P>0.05$),各林型间的差异也不显著;3个林型及对照土柱淋滤液的pH值均显著低于未经土柱过滤的污水;各林型土柱淋滤液中溶解氧均高于未经土柱过滤的污水,但差异并不显著,且与对照无显著差异;除蒙古栎人工林外,其他两个林型及对照土柱淋滤液的氧化还原电位、电导率和总溶解固体与未经土柱过滤的污水相比均显著增加。

关键词 森林土壤; 污水处理; 原状土柱; 淋滤

Purification capacity for treating sewage of urban forest soil in Harbin. DUAN Wen-biao, DUAN Wen-jing, CHEN Li-xin*, SHEN Hai-long, HAN Dong-hui, QU Mei-xue, AMADOU Touré, ZHANG Yu-shuang (*School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin* 150040, *China*).

Abstract: To ascertain the purification capacity of urban forest soil of different forest types for treating sewage and provide scientific basis for the configuration of waterfront shelter forests, we selected three forest types (*Quercus mongolica* plantation, *Fraxinus mandshurica* plantation, *Phellodendron amurense* plantation) in the demonstration base of urban forest in Harbin as the research object and bare land as the control. The Majiagou sewage was collected for indoor simulated irrigation. The compositions of soil column leachate following irrigation were measured. The results showed that the removal effects of ammonium in the three forest soils were significant ($P<0.05$). The ammonium absorbed in the soil column was not different among three forest soils, which was also not significant from the control ($P>0.05$). The concentration of nitrate in leachate from the soil columns in three forest types and the control increased significantly as compared with the sewage without soil column filter ($P<0.01$), which increased with the water inflow. The quality of nitrate leached from the soil column of three forest types was lower than that of the control, but the difference was not significant ($P>0.05$). The pH of leachate from the soil columns of three forest types and the control was significantly lower than that without soil column filter. The dissolved oxygen in leachate from the soil columns of each forest type was higher than that without soil column filter, but the difference was not significant. Except for the *Q. mongolica* plantation, the redox potential, electrical conductivity, and total dissolved solids in the leachates from soil columns of other two forest types and the control increased significantly compared with the sewage without filtered soil column.

Key words: forest soil; sewage disposal; intact soil column; leaching.

国家科技支撑计划(2015BAD07B06-5)资助。
收稿日期: 2017-10-10 接受日期: 2018-04-18
*通讯作者 E-mail: lxchen88@163.com

近年来,随着中国城市化进程不断加快,城市水污染问题已经成为人们广泛关注的问题。点源和面源污染是水污染的两大问题。一直以来,人们认为点源污染是城市内河水污染的主要来源。但很多经验表明,即使点源污染达到了“零排放”,仍然不能使水环境质量得到根本改善,究其原因是面源污染占到了较大的比重,其中城市面源污染占有的比例正在提高(王珊珊等,2014)。城市面源污染是指在降水条件下,雨水和径流冲刷城市地面,使溶解的固体污染物从非特定的地点汇入受纳水体,引起的水体污染(倪艳芳,2008)。城市面源污染的污染物包括:悬浮颗粒物(SS)、有机物、氮、磷、微生物和重金属等,主要影响因素为气候状况、污染物特征及城市特征(李春林等,2013)。

城市地域内以林木为主的各种片林、林带、散生树木等林地构成了城市森林主体(王成等,2004)。城市森林土壤是城市森林的载体和养分供应者,是土壤微生物的栖息地,是城市污染物的汇集地和净化器,其渗水、保水功能可以对城市污水进行过滤、净化(杨芹芹,2012)。胡建等(2011)对太湖地区主要土地利用/覆盖类型的相对面积占比与水质等级之间的相关性进行了研究,结果表明,林地对水质改善能力较强,对水质的正贡献最大。陈金林等(2002)研究了杨树和水杉林带对太湖地区农业非点源污染的控制,认为缓冲林带有利于截留和净化土壤径流中的 N、P 等物质。郭振苗(2014)通过土柱模型试验表明,在无植物生长条件下,土壤对污水中氮素的去除作用明显,总氮去除率在 30% 以上。Peterjon 等(1984)研究表明,宽度为 50 m 的森林河岸带每年吸收的 N 和 P 分别为 77 与 10 kg · hm^{-2} · a^{-1}。Kristiansen(1981)认为,土壤对污水中污染物的去除机理是土壤颗粒吸附、化学沉淀、微生物同化作用、植物吸收等。综上,国内外有关植被带对面源污染防治已有不少研究,但对于不同林型城市森林土壤对污水净化能力的研究报道较少。

化学肥料和农家肥料、城镇生活污水及工业废水均含有大量氮素,其中主要是铵态氮,其次是硝酸盐氮,氮素是导致水体富营养化的因素之一,因此氮素的去除是污水治理的重要环节(张玉枝等,2013;王诗乐等,2015)。电导率、氧化还原电位、溶解氧和总溶解固体虽不是水体污染物,但是它们间接反映了水体受有机物、无机盐及溶解性杂质污染的程度。pH 值是重要的水质指标之一。本文选择哈尔滨市城市林业示范基地内代表性的 3 个林型(蒙古栎人工林、黄檗人工林、水曲柳人工林)作为研究对象,并以与其毗邻的无植被生长的裸地作为对照,通过室内土柱模拟法,使用定期采集于马家沟的污水进行室内模拟浇灌,对土柱淋滤液中以上指标进行测定与分析,主要探究哈尔滨市城市森林不同林型人工林土壤对城市污水的净化能力及其与对照的差异。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

哈尔滨城市林业示范基地(45° 43′ 11″ N,126°37′15″ E)位于哈尔滨市中心城区,主要包括南岗区和香坊区的部分地区,处于马家沟河岸边,海拔 145~175 m,属于中温带大陆性季风气候,冬长夏短,年均降水量 569.1 mm。土层深厚,土壤肥沃,占地面积约 44 hm^2。原生植被为沟谷草甸草原,土壤类型为黑土,1949 年以前为耕地,在 20 世纪 50 年代栽植水曲柳(*Fraxinus mandschurica*)、黄波罗(*Phellodendron amurense*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黑皮油松(*Pinus tabuliformis* var. *mukdensis*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)等人工纯林和人工针阔混交林(杨芹芹,2012)。

马家沟河,松花江干流南岸支流,位于黑龙江省南部,发源于哈尔滨市阿城区,流经哈尔滨市平房、动力、南岗、道外 4 个区,全长 44.3 km,随着经济发展,城市人口增多,环保措施不力,排污口不断增加,到 1990 年初全流域有排污口 142 处,排放生活污水和工业用水,日排放量达 20×10^7 kg 以上,非雨季时马家沟河流水全部是污水,成了“污水河”(王莉等,2008;张欣宇,2012)。虽然经过多次整治马家沟的水质状况及岸边景观有所改善,但是水环境水体污染依旧非常严重。

1.2 样地设置与样品采集

2016 年 5 月在哈尔滨城市林业示范基地选择蒙古栎人工林(QM)、黄檗人工林(PA)、水曲柳人工林(FM)3 个林型及与其毗邻无植被生长的裸地(对照,CK)作为研究对象。各林型试验样地基本特征及土壤基本理化性质见表 1,无植被生长的裸地为撂荒地,紧邻马家沟河,早年堆积马家沟底部清理的污泥。在每个林型内,选择远离林缘、道路和人为扰动过的地方,设置3块30 m×30 m的样地。在每

表1 哈尔滨市城市林业示范基地3种林型人工林基本特征和土壤理化性质

Table 1 Basic stand characteristics and soil physical and chemical properties of three forest types in the demonstration base of urban forest in Harbin

林型	人工林基本特征					土壤理化性质				
	面积 (hm^2)	林龄 (a)	平均树高 (m)	平均胸径 (m)	林分密度 ($Trees \cdot hm^{-2}$)	容重 ($g \cdot cm^{-3}$)	田间持水量 (mm)	pH	铵态氮含量 ($mg \cdot kg^{-1}$)	硝态氮含量 ($mg \cdot kg^{-1}$)
FM	5.5	51	20.6	32.1	960	1.03±0.04 a	0.219±0.008 a	6.92±0.29 b	2.36±0.01 d	4.90±0.02 b
PA	0.8	57	10.5	17.1	1175	1.05±0.07 a	0.201±0.001 a	6.61±0.10 c	3.05±0.04 c	1.55±0.01 c
QM	0.5	48	14.4	19.1	1471	1.13±0.01 a	0.205±0.004 a	5.19±0.19 d	3.99±0.03 a	0.47±0.02 d
CK	-	-	-	-	-	1.20±0.11 a	0.176±0.001 b	7.14±0.13 a	3.35±0.01 b	10.74±0.31 a

同列不同小写字母表示林型间差异显著($P<0.05$)。

个样地中,沿对角线设置3个采样点,用直径9 cm和高度25 cm的PVC管在每个采样点采集1个高度为20 cm的原状土柱,并依次分别对其编号:QM1~QM9、PA1~PA9、FM1~FM9、CK1~CK9,然后用无菌塑料布包好,将其小心带回实验室。另外,在每个土柱附近10 cm深度处分别采集1个环刀样和500 g左右的土样,将其装入无菌封口塑料袋中带回实验室备用。

1.3 室内土柱运行

把装有原状土柱的PVC管的底端放置一层粗滤纸和两层80目尼龙网,将其牢牢固定于自行设计和制作的木质支架(图1)的上层,将与PVC管径相当的漏斗置于支架的下层,漏斗下方使用500 mL广口瓶承接经土柱过滤的淋滤液。

使用采集于马家沟的污水分别浇灌以上36个土柱,每次浇水持续3 d,阴干20 d,23 d为一个试验循环周期,共设置5个周期的浇灌。试验时间为2016年7月2日—10月23日。试验采用间歇式进水,以上进下出的方式,每天上午9:00前去马家沟取水,上午9:00开始进水,在各原状土柱中分别加入50 mL污水,淋溶期间不断加水,保持3 cm水头。设置3个进水量处理,其中QM1~QM3、PA1~PA3、FM1~FM3、CK1~CK3每天进水总量为200 mL,QM4~6QM、PA4~PA6、FM4~FM6、CK4~CK6每天进水总量为350 mL,QM7~QM9、PA7~PA9、FM7~FM9、CK7~CK9每天进水总量为500 mL,每隔24 h取1次出水样品,将其保存于4 ℃低温冰箱中备用。本项试验开始前,先将土柱放置一个月避免土柱里的根系对试验结果造成影响。

1.4 指标测定与数据处理

使用连续流动分析仪(AutoAnalyzer 3, Bran+Luebbe公司,德国)(闵金海等,2003;刘志伟,2012)分别测定污水、淋滤液和土壤中的铵态氮、硝态氮,利用多参数水质监测仪(HORIBAW-23Xd,日本)(赵雨森等,2008)分别测定其pH值、溶解氧(DO)、电导率(COND)、总溶解固体(TDS)和氧化还原电位(ORP)。

污水及土柱淋滤液中铵态氮及硝态氮质量的计算公式为:$M=C\times V$。式中:M为质量;C为淋滤液或污水中铵态氮或硝态氮的浓度;V为淋滤液或污水的体积。去除率的计算公式为:$P=(M_1-M_2)\cdot M_1^{-1}\cdot 100\%$。式中:$M_1$为污水中物质的质量;$M_2$为淋滤液中物质的质量。利用Excel 2013软件对数据进行统计分析,采用SPSS 22.0中单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著极差法(LSD)分析不同处理组间的差异,差异显著性检验($\alpha=0.05$),制图数据均以"平均值±标准差"(Mean±SD)的形式表示。利用OriginPro 2016作图。

2 结果与分析

2.1 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中铵态氮质量的变化

由图2可知,未经土柱过滤的污水(SW)中铵态氮质量随时间变化的波动较大,但水曲柳人工林土

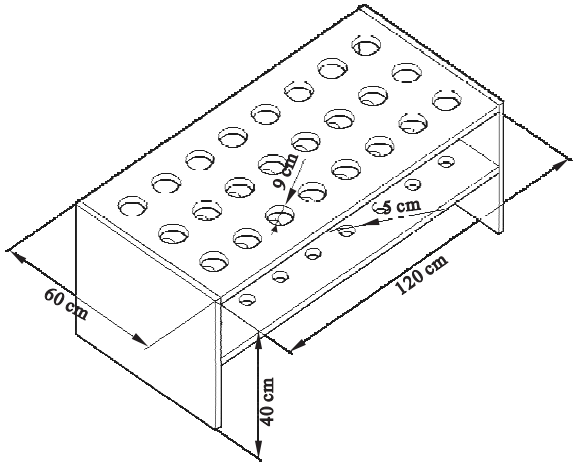


图1 自制木质支架示意图

Fig.1 Schematic diagram of self-made wooden stand

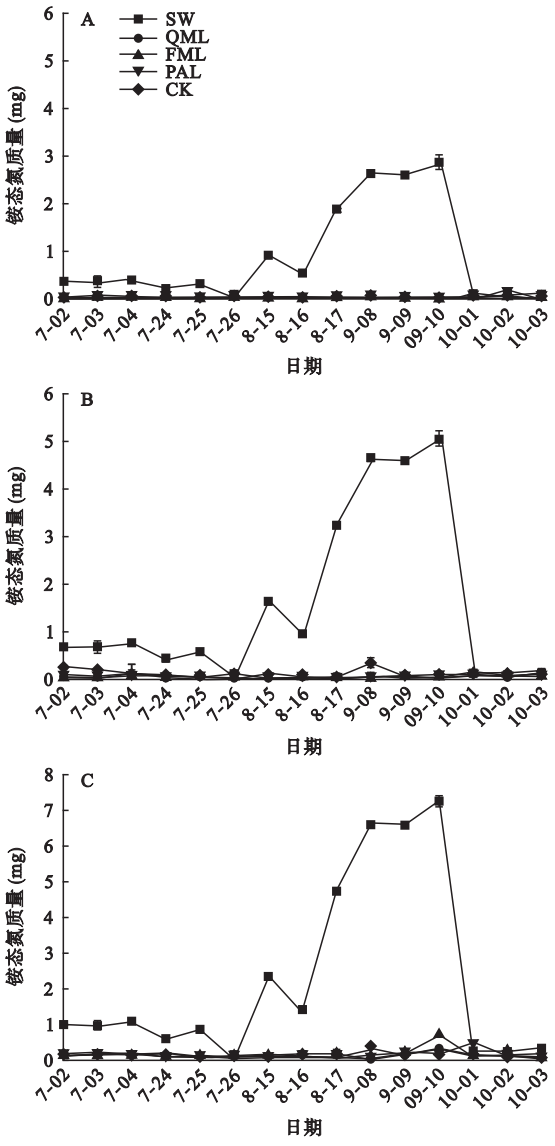


图 2 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中铵态氮质量的变化

Fig.2 Changes of ammonium nitrogen quantity in the sewage without filtration of soil column and leachate of soil column

SW.未经土柱过滤的污水, FML.水曲柳人工林土柱淋滤液, PAL.黄檗人工林土柱淋滤液, QML.蒙古栎人工林土柱淋滤液, CK.无植被生长的裸地(对照), A 为进水量 200 mL · d^{-1}, B 为进水量 350 mL · d^{-1}, C 为进水量 500 mL · d^{-1}。下同。

柱淋滤液(FML)、黄檗人工林土柱淋滤液(PAL)、蒙古栎人工林土柱淋滤液(QML)及对照(CK)的铵态氮质量无显著变化,均在 0~0.64 mg 范围内,极显著低于 SW(P<0.01),而在相同进水量下不同林型土柱淋滤液中铵态氮质量差异均不显著(P>0.05)。随着进水量的增加,各林型土柱吸附的铵态氮量也增加。3 个进水量中各林型土柱对铵态氮的去除率大小排列顺序不同:进水量 200 mL · d^{-1} 中 FML>PAL>CK>QML;进水量 350 mL · d^{-1} 中 FML>PAL>QML>CK;进水量 500 mL · d^{-1} 中 FML>QML>PAL>CK;但各林型及 CK 间的差异不显著(P>0.05),去除率均超过 90%。这说明由于土壤的吸附和硝化作用,本文选择的 3 个林型及对照对污水中的铵态氮去除效果明显。

2.2 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中硝态氮质量的变化

由图 3 可知,在 3 种浇灌量下,FML、PAL、QML 及 CK 的土柱淋滤液中的硝态氮质量均极显著高于 SW 中硝态氮质量(P<0.01),且淋滤液中硝态氮质量随时间变化的波动较大。在相同浇灌量下不同林

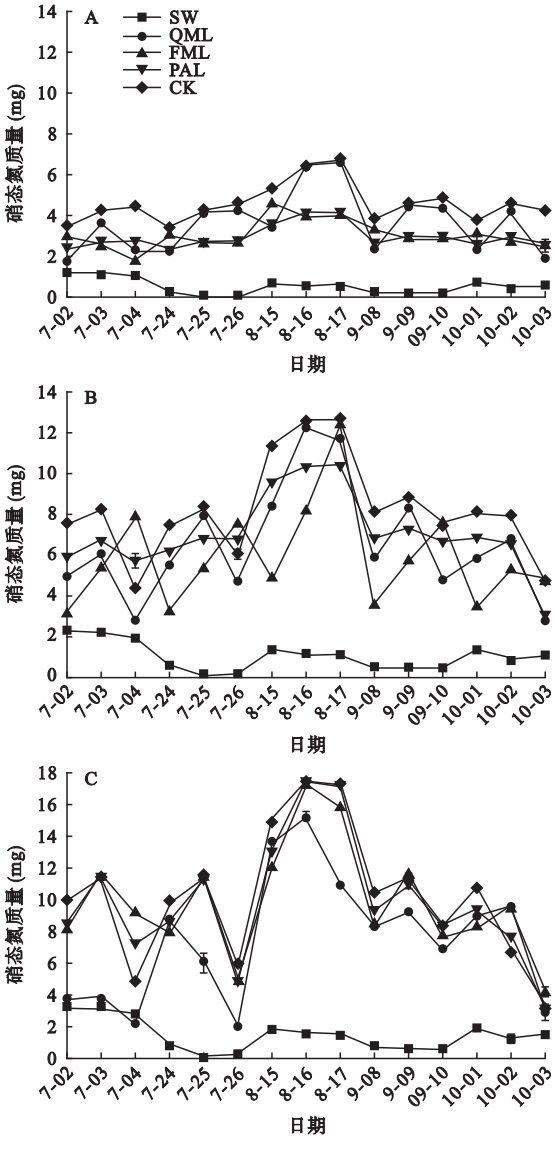


图 3 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中硝态氮质量的变化

Fig.3 Changes of nitrate nitrogen quantity in the sewage without filtration of soil column and leachate of soil column

型土柱淋滤液和同一林型不同浇灌量的土柱淋滤液中硝态氮质量差异均不显著($P>0.05$)。随着进水量的增加,各林型土柱中淋出的硝态氮量增加,在整个试验中,3个进水量下各林型土柱淋滤液中硝态氮总量排列顺序不同:进水量为200 mL·d^{-1}时,CK>QML>FML>PAL;进水量为350 mL·d^{-1}时,CK>PAL>QML>FML;进水量为500 mL·d^{-1}时,CK>PAL>FML>QML;3个进水量中CK中的硝态氮量均最大,但与其他3个林型的差异并不显著($P>0.05$)。

2.3 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中pH值和溶解氧的变化

由图4可以看出,3个进水量中各林型土柱淋滤液与SW的pH值变化关系一致,3个林型土柱淋滤液pH值均显著低于SW的pH值($P<0.05$),但与CK间的差异不显著。3个进水量中各林型土柱淋滤液及SW的pH值大小排列顺序一致,均为SW>CK>FML>PAL>QML,并且最大值均出现在9月8—10日,除部分QML的pH值偏弱酸性,不在GB 18918-2002规定pH之内,其他林型土柱淋滤液pH值均在其范围内,变化范围为6~9。QML的pH值最低,为5.57。

由图5可知,与SW相比,各林型土柱淋滤液中溶解氧大部分升高,但变化并不显著($P<0.05$),且与CK无显著差异。3个进水量下最大值均出现在

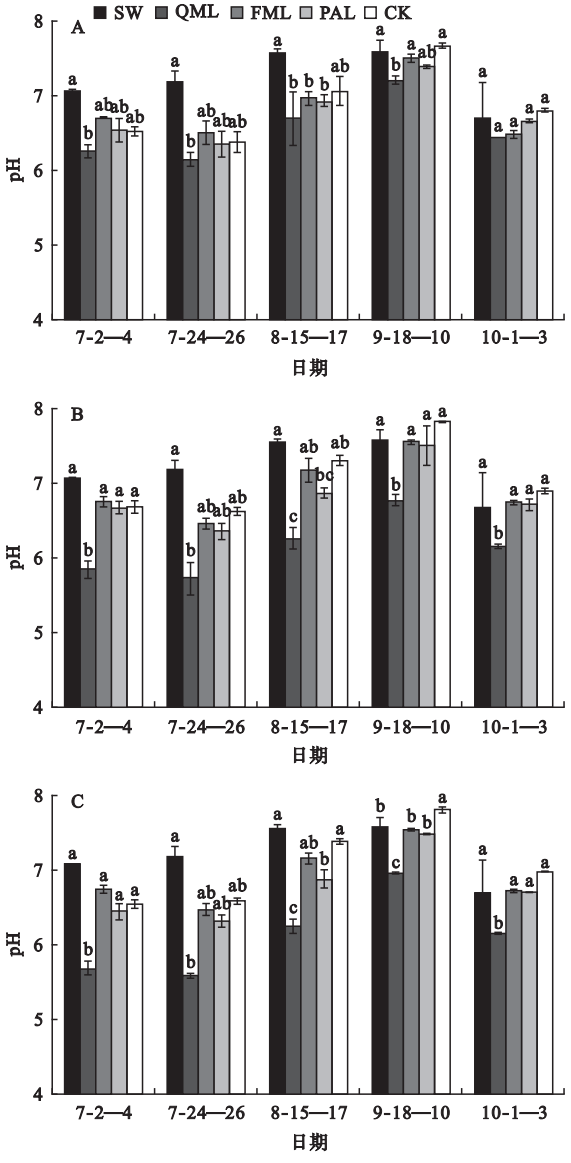


图4 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中pH值的变化

Fig.4 Changes of pH in the sewage without filtration of soil column and leachate of soil column

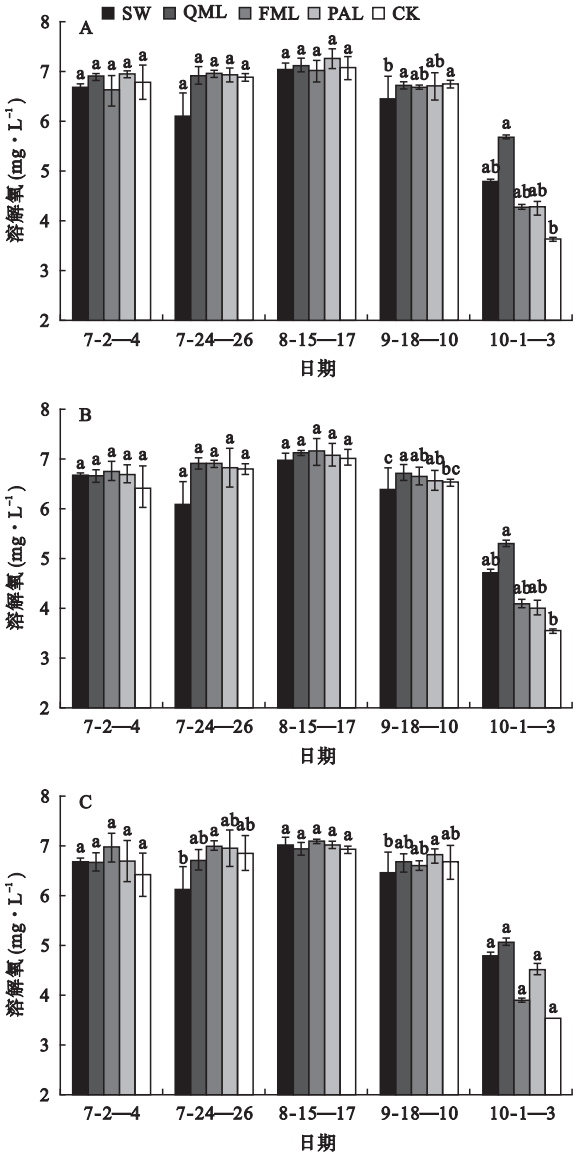


图5 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中溶解氧的变化

Fig.5 Changes of dissolved oxygen in the sewage without filtration of soil column and leachate of soil column

8 月 15—17 日,最小值均出现在 10 月 1—3 日,10 月份之前变化范围为 7.68~5.24 mg · L^{-1},10 月污水和各林型土柱淋滤液中溶解氧含量变化范围为 6.60~3.44 mg · L^{-1},显著低于 10 月之前溶解氧含量,可能是由于 10 月取水时哈尔滨最低气温经测量已经达到了 0 ℃,导致溶解氧偏低。

2.4 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中电导率、氧化还原电位和总溶解固体的变化

由图 6 可知,FML、PAL 及 CK 的电导率与 SW 相比均极显著增加($P<0.01$),其中 QML 的电导率极显著低于 CK 及 PAL($P<0.01$)。3 个进水量下各林型土柱淋滤液的电导率排列顺序不同:进水量 200 mL · d^{-1} 中 PAL>CK>FML>SW>QML;进水量 350 mL · d^{-1} 中 CK>PAL>FML>SW>QML;进水量 500 mL · d^{-1} 中 CK>FML>PAL>SW>QML;但 3 个进水量中 PAL、CK 和 FML 的差异不显著。除 PAL 的电导率在进水量 200 mL · d^{-1} 中显著高于进水量 500 mL · d^{-1}($P<0.05$),其他林型及 CK 电导率在 3 个进水量中皆无显著变化。

由图 7 可知,在进水量 200 mL · d^{-1} 中,FML 和 PAL 的氧化还原电位均显著高于 SW($P<0.05$),CK 的氧化还原电位与 SW 相比极显著增加($P<0.01$),QML 的氧化还原电位显著低于 CK($P<0.05$)。在进

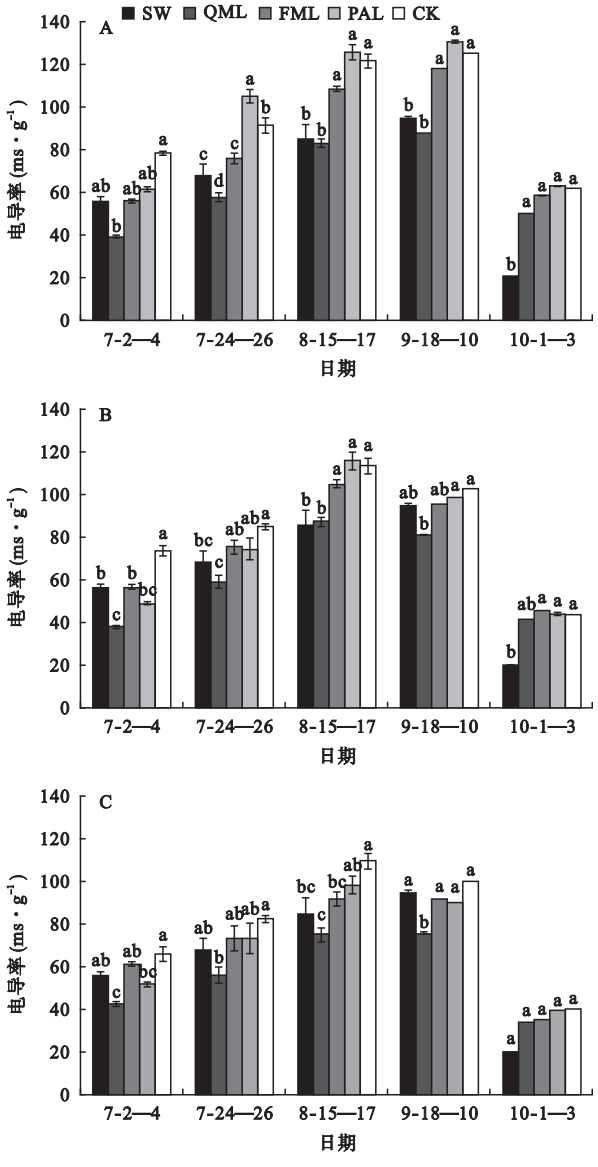


图 6 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中电导率的变化

Fig.6 Conductivity changes in the sewage without filtration of soil column and leachate of soil column

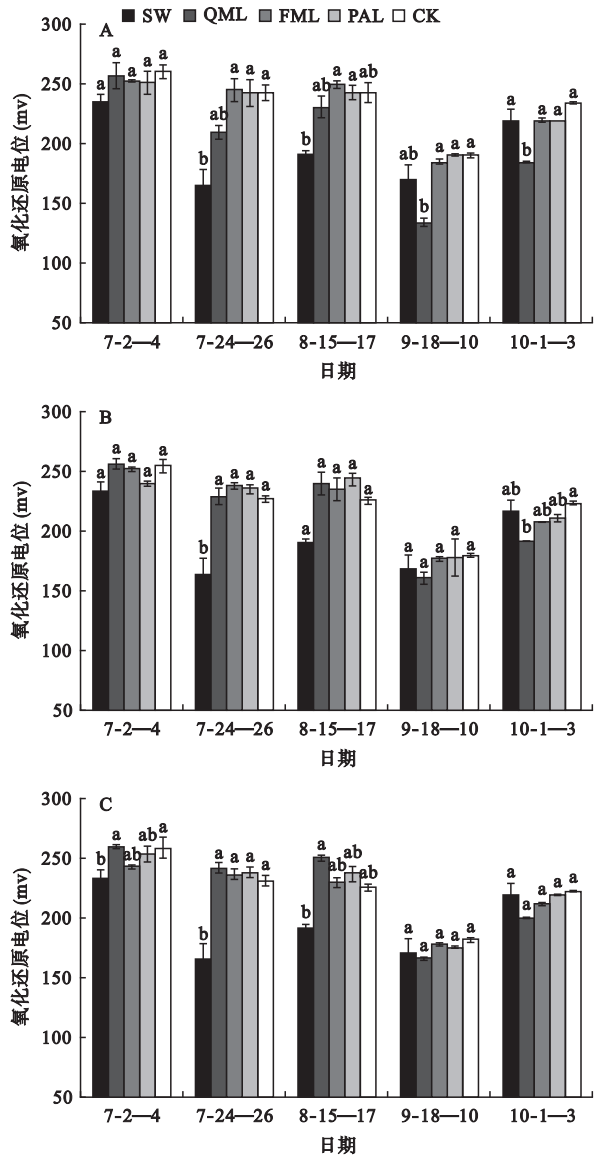


图 7 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中氧化还原电位的变化

Fig.7 Changes of redox potential in the sewage without filtration of soil column and leachate of soil column

水量350 mL·d^{-1}中,PAL、FML和CK的氧化还原电位与SW相比均显著增加(P<0.05)。在进水量500 mL·d^{-1}中,PAL、QML和CK土柱淋滤液的氧化还原电位与SW相比均显著增加(P<0.05)。PAL、FML、QML及CK的氧化还原电位在3种不同进水量中皆无显著变化。

从图8可以看出,FML、PAL及CK的总溶解固体与SW相比均增加。在进水量200 mL·d^{-1}中,PAL及CK的总溶解固体与SW相比极显著增加(P<0.01),QML总溶解固体极显著低于CK及PAL(P<0.01)。进水量350 mL·d^{-1}中,SW及QML的总溶解固体显著低于CK(P<0.05)。进水量500 mL·d^{-1}中,QML的总溶解固体显著低于CK(P<0.05)。3个进水量处理中各林型土柱淋滤液及SW的总溶解固体大小排列顺序一致,均为CK>PAL>FML>SW>QML,除PAL的总溶解固体在进水量200 mL·d^{-1}中显著高于进水量500 mL·d^{-1}(P<0.05),其他林型及CK的总溶解固体在3种不同的进水量中皆无显著变化。

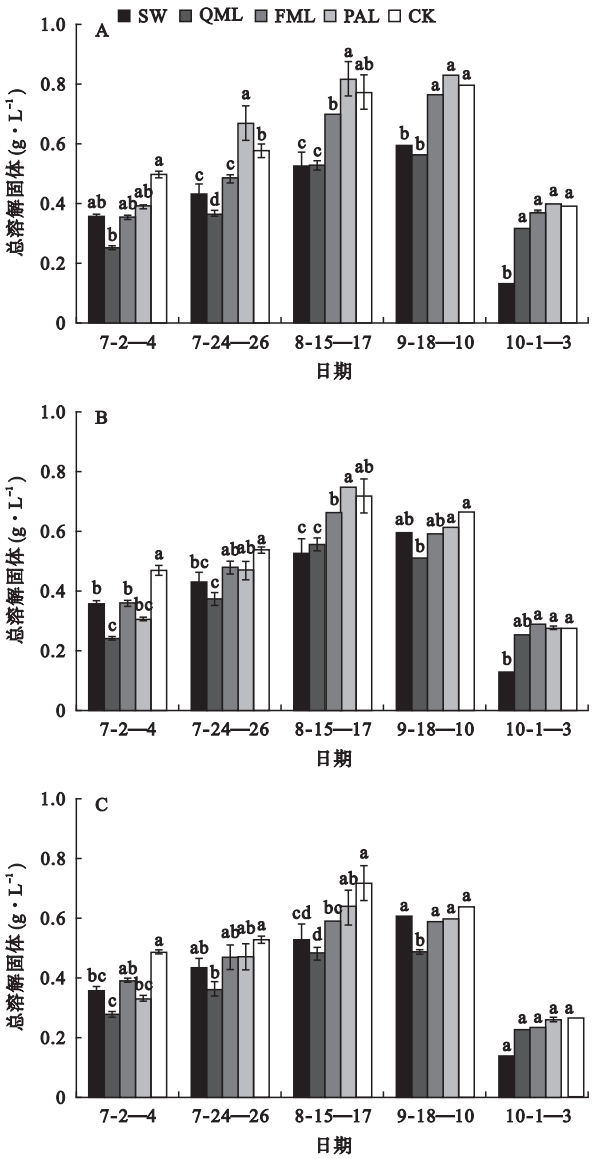


图8 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中总溶解固体的变化

Fig.8 Changes of total dissolved solids in the sewage without filtration of soil column and leachate of soil column

3 讨 论

3.1 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中铵态氮质量变化特征

氮素是导致水体富营养化的因素之一,当水中铵态氮含量高时会导致鱼类死亡(武轩韵等,2015)。本研究表明,FML、PAL、QML及CK的铵态氮质量极显著低于SW中铵态氮质量(P<0.01),并且随着进水量的增加,各林型土柱吸附的铵态氮量也增加,去除率均超过90%。王红玲等(2015)用人工配制的污水对柳树林带进行灌溉,发现柳树林带对铵态氮的去除率为95.4%;Duan等(2015)利用收获后的葡萄园处理畜牧场废水的研究结果表明,出水中铵态氮浓度降低了78%;Poach等(2004)通过湿地-池塘-湿地构造的系统处理养猪厂废水也得到了一致的研究结果。土壤渗透去除氮素的机理包括土壤的吸附、过滤、沉淀、离子交换、植物的吸收、生物的硝化和反硝化作用等,其中硝化和反硝化作用是最主要的途径(尹连庆等,2008;李海波等,2015)。淋溶后收集到的全部淋滤液中铵态氮的质量较小,200、350、500 mL·d^{-1} 3种不同进水量下,QML约占原始引入量的5.23%~5.74%,FML为3.66%~5.68%,PAL为3.69%~5.78%,CK为5.18%~7.45%;且随着总的进水量的增加,被淋溶下的铵态氮总量变化不明显,表明铵态氮一旦被土壤吸附,则不易被解吸;各土柱对铵态氮有良好净化作用,可能是因为:(1)土壤胶体带负电,对铵态氮的吸附作用十分明显,并且铵态氮向下的迁移能力差(张翠云等,2001;郭振苗,2012);(2)水中的铵态氮主要通过硝化作用去除,硝化作用过程需要大量氧气,利用干湿交替的方式可使土壤中的氧气量增多(王书文等,2006;王德春等,2009),此次试验采用浇水3 d阴干20 d,保证了土壤的复氧率和硝化细菌的活性。但本研究中,3个进水量中各林型对铵态氮的去除率大小排列顺序不同,各林型及CK

间的差异不显著。

3.2 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中硝态氮质量变化特征

水中的硝态氮易被还原为亚硝酸盐,亚硝酸盐对人体健康极为不利,如长期饮用极易引发癌症等疾病。本文研究表明,FML、PAL、QML 及 CK 的硝态氮量与 SW 相比均极显著增加($P<0.01$),200、350、500 mL·d^{-1} 3 种不同进水量下,QML 中硝态氮质量为 54.65~110.56 mg,FML 为 45.99~146.96 mg,PAL 为 44.71~147.55 mg,CK 为 69.13~153.20 mg;3 个进水量中各林型土柱淋滤液中硝态氮总量大小排列顺序不同,但均为 CK 淋出的硝态氮量最高。随着进水量的增加,各林型土柱中淋出的硝态氮量增加。王丽影等(2006)在冬小麦灌区内进行污水灌溉情况下,对氮素在污水灌溉系统中的转化情况进行了实验研究,短期灌水后,污水对于灌区土壤中氮素分布情况无显著影响,当灌溉时间超过 3 个月后,土壤中层硝态氮含量将会增加;Laaksonen 等(2017)利用砂滤器处理城市污水,发现砂滤器中硝化作用活跃,反硝化作用效率低下,产生了很高的硝酸盐。影响硝态氮淋失的因素有很多,土壤质地、通气性、有机质含量、灌溉、施肥等均影响着土壤硝态氮的淋溶。Zhou 等(2006)研究表明,粘壤土氮素淋失量仅为施氮量的 5.7%~9.6%,而砂壤土氮素淋失量可达施氮量的 6.2%~30.4%,表明在通透性好的砂壤土中氮素更易发生淋溶损失,这可能是本文中土柱淋滤液硝态氮量显著增加的主要原因。以上研究均表明,硝态氮的淋溶性相对较好,有可能诱发灌区地下水污染。

3.3 未经土柱过滤的污水及土柱淋滤液中 pH 值、溶解氧、电导率、氧化还原电位和总溶解固体变化特征

本研究中,FML、PAL、QML 及 CK 的 pH 值均显著低于 SW,且在 3 个进水量中大小排列顺序一致,均为 SW>CK>FML>PAL>QML。赵建芬等(2006)将生活污水灌溉于土壤深度 1 m 的土地处理系统中,发现灌溉污水的 pH 值平均为 8.27,排出水 pH 值平均为 7.86。而 Alrajhi 等(2017)和 Sparling 等(2006)的研究却得到了不同的结果,他们用污水对不同类型土地浇灌,发现排出水的 pH 值均升高。产生这种不同结果可能是因为研究中运用的污水水质和土壤的差异。除部分 QML 的 pH 值偏弱酸性,不在 GB 18918-2002 规定 pH 之内,其他林型土柱淋滤液 pH 值均在其范围内,变化范围为 6~9。与 SW 相比,各林型土柱淋滤液中溶解氧大部分升高,但变化并不显著,且与 CK 无显著差异。除 QML 外,其他两个林型及 CK 土柱淋滤液的氧化还原电位、电导率和总溶解固体与未经土柱过滤的污水相比都显著增加,说明污水经过土柱后无机盐及溶解物杂质的含量增加。土壤中的粘粒、粉粒和有机质越多,硝态氮就越不易淋失(李桐,2010)。不同林型间相比较,QML 的氧化还原电位、总溶解固体、电导率和硝态氮浓度都低于其他两个林型和 CK,这与蒙古栎人工林土壤容重大,粘粒含量高有很大关系。需要指出的是,不同林型土壤对污水中污染物的去除涉及多学科的内容,净化效果也受到多种因素的综合影响。本文仅研究了无植被生长的森林土壤,并且改变了气候、水文、生物等外部条件,不能精确地诠释本项研究的目的,污染物在不同林型土壤中的去除模式、作用机制、动力学过程等尚需进一步研究。

4 结 论

供试的 3 个林型及裸地土壤对污水中铵态氮去除效果显著但土柱淋滤液中硝态氮质量极显著增加,3 个进水量中各林型土柱淋滤液中硝态氮和铵态氮量大小排列顺序不同且差异不显著;3 个林型及对照土柱淋滤液的 pH 值降低并且大小次序一致,均为未经土柱过滤的污水>对照>水曲柳人工林土柱淋滤液>黄檗人工林土柱淋滤液>蒙古栎人工林土柱淋滤液;各林型土柱淋滤液中溶解氧升高,但与对照无显著差异;除蒙古栎人工林土柱淋滤液外,其他两个林型及对照土柱淋滤液的氧化还原电位、电导率和总溶解固体与未经土柱过滤的污水相比均显著增加。

参考文献

陈金林, 潘根兴, 张爱国, 等. 2002. 林带对太湖地区农业非点源污染的控制. 南京林业大学学报:自然科学版, **26**(6): 17-20.

郭振苗. 2014. 污水中氮素在无植物生长土壤中的迁移与去除试验研究. 节水灌溉, (4): 35-38.

郭振苗. 2012. 农村生活污水土壤渗滤过程中氮素运移试验研究(硕士学位论文). 北京: 清华大学.

胡 建, 刘茂松, 周 文, 等.2011. 太湖流域水质状况与土地利用格局的相关性. 生态学杂志, **30**(6): 1190-1197.

李春林, 胡远满, 刘 淼, 等. 2013. 城市非点源污染研究进展. 生态学杂志, **32**(2): 492-500.

李海波, 王鹏飞, 李英华. 2015. 用于城市径流净化的岸堤漫流技术的植物与基质的组配方式. 江苏农业科学, **43**(7): 357-360.

李 桐. 2010. 通辽污灌土壤氮素含量分析及迁移转化实验研究(硕士学位论文). 北京: 北京交通大学.
刘志伟. 2012. 流动注射仪测定地表水中氨氮. 广州化工, **40**(6): 111-112+160.
闵金海, 朱汉昌. 2003. 连续流动分析在水质监测中的应用. 中国环境监测, **19**(5): 32-34.
倪艳芳. 2008. 城市面源污染的特征及其控制的研究进展. 环境科学与管理, **33**(2): 53-57.
王 成, 蔡春菊, 陶康华. 2004. 城市森林的概念、范围及其研究. 世界林业研究, **17**(2): 23-27.
王德春, 孙凌帆. 2009. 污水土地处理 NH_3-N 去除率的影响因素研究. 北京工商大学学报:自然科学版, **27**(5): 10-13.
王红玲, 王瑞刚, 施士争, 等. 2015. 柳林污水处理系统净化效率研究. 江苏林业科技, **42**(4): 5-10.
王 莉, 张晓静, 丁 晖. 2008. 哈尔滨市加大内河整治力度的主要工程措施. 黑龙江水利科技, **36**(3): 112-113.
王丽影, 杨金忠, 黄 凯, 等. 2006. 冬小麦污水灌溉条件下土壤中氮素转化试验研究. 灌溉排水学报, **25**(6): 1-4+14.
王诗乐, 张 帅, 王 贺, 等. 2015. 内河滨岸缓冲带不同植被配置对面源污水 NH_4^+-N 的去除效果. 森林工程, **31**(5): 7-10, 14.
王珊珊, 张 帅, 王诗乐, 等. 2014. 河岸带乔木树种配置方式对面源污染物 NH_4^+-N 的去除效果. 森林工程, **30**(4): 27-30.
王书文, 刘庆玉, 焦银珠, 等. 2006. 生活污水土壤渗滤就地处理技术研究进展. 水处理技术, **32**(3): 5-10.
武轩韵, 孙向阳, 栾亚宁, 等. 2015. 5 种基质对污水中氨氮的去除效果筛选及研究. 水处理技术, **41**(2): 52-55.
尹连庆, 谷瑞华. 2008. 人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究. 环境工程, **26**(S1): 151-155.
杨芹芹. 2012. 城市人工林土壤养分状况与微生物群落结构的研究(硕士学位论文). 哈尔滨: 东北林业大学.
张翠云, 张 胜, 贾秀梅, 等. 2001. 三氮吸附性能对比实验研究. 勘察科学技术, (5): 37-39.
张玉枝, 唐 飞, 张永清, 等. 2013. 不同水生植物及其组合对污水中氮磷去除效果研究. 现代农业科技, (15): 237-238+ 240.
张欣宇. 2012. 马家沟滨水环境的问题研究(硕士学位论文). 哈尔滨: 东北林业大学.
赵建芬, 马香玲, 靳路明, 等. 2006. 污水慢速渗滤土地处理系统的改进试验研究. 农业工程学报, **22**(9): 85-88.
赵雨森, 辛 颖, 曾凡锁. 2008. 阿什河源头水源涵养林在水分传输过程中对水质的影响. 林业科学, **44**(6): 5-9.
Alrajhi A, Beecham S, Hassanli A. 2017. Effects of partial root-zone drying irrigation and water quality on soil physical and chemical properties. *Agricultural Water Management*, **182**: 117-125.
Duan J, Geng C, Li X, *et al*. 2015. The treatment performance and nutrient removal of a garden land infiltration system receiving dairy farm wastewater. *Agricultural Water Management*, **150**: 103-110.
Kristiansen R. 1981. Sand-filter trenches for purification of septic tank effluent: I. The clogging mechanism and soil physical environment. *Journal of Environmental Quality*, **10**: 353-357.
Laaksonen P, Sinkkonen A, Zaitsev G, *et al*. 2017. Treatment of municipal wastewater in full-scale on-site sand filter reduces BOD efficiently but does not reach requirements for nitrogen and phosphorus removal. *Environmental Science & Pollution Research*, **24**: 11446-11458.
Peterjohn WT, Correll DL. 1984. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: Observations on the role of a riparian forest. *Ecology*, **65**: 1466-1475.
Poach ME, Hunt PG, Reddy GB, *et al*. 2004. Swine wastewater treatment by marsh-pond-marsh constructed wetlands under varying nitrogen loads. *Ecological Engineering*, **23**: 165-175.
Sparling GP, Barton L, Duncan L, *et al*. 2006. Nutrient leaching and changes in soil characteristics of four contrasting soils irrigated with secondary-treated municipal wastewater for four years. *Soil Research*, **44**: 107-116.
Zhou JB, Chen JG, Zhu J, *et al*. 2006. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: A soil column method. *Pedosphere*, **16**: 245-252.

作者简介 段文标,男,1964 年生,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持、森林气象学等方面的研究。E-mail: dwbiao88@126.com
责任编辑 张 敏