

太湖地区小流域水文过程对氮素迁移的影响

刘宏伟^{1,3}, 余钟波^{1,2*}, 崔广柏³ (1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098; 2. Department of Geoscience, University of Nevada, Las Vegas, NV 89154-4010, USA; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

摘要 分析了太湖地区农业小流域逐日降雨径流和暴雨事件对氮素营养物输出的影响规律。结果表明:总氮、铵态氮和硝态氮流失日平均浓度随降雨量和径流量的增大而增大,总氮最大,硝态氮次之,铵态氮最小。暴雨事件中,径流起涨初期氮素浓度迅速升高,之后逐渐降低,在退水时期会有所反弹。暴雨事件中的瞬时流量与氮素输出浓度关系按流量大小可分为3段:在小流量段,氮素浓度低且数量平稳;中流量段,各态氮素流失浓度变化大;高流量段,总氮和铵态氮流失浓度显著降低并逐渐平稳,硝态氮浓度略为降低但变化较大。

关键词 非点源污染;氮素流失;农业小流域;太湖流域

中图分类号 X143 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2009)28-13759-04

Effects of the Hydrological Processes on Nitrogen Migration in a Small Watershed on the Taihu Lake

LIU Hong-wei et al (State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098)

Abstract The effects of daily rainfall runoff and heavy rains events on nutrient nitrogen output in the Taihu Lake agricultural watershed were analyzed. The results showed that the daily mean concentration in runoff of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen increased with the daily rainfall and runoff increasing, and the loss of TN was the most, then followed by nitrate nitrogen and ammonium nitrogen. During the storm events, nitrogen concentration increased fastly at beginning of runoff, then decreased gradually, and there was a rebound in the period of withdrawal of water. The relationship of the discharge and nitrogen output could be identified 3 parts separated by the discharge: Part 1 was the low discharge part, the concentrations of the nitrogen appear low and steady; part 2 was the mid-discharge part, all the forms of the nitrogen concentration change acutely; part 3 is the high-discharge part, the TN and ammonium concentration decrease obviously and tend to be steady, while the nitrate concentration decrease a little, and the values vary in a wide range.

Key words Non-point sources pollution; Nitrogen loss; Agricultural small watershed; Taihu Lake drainage basin

水环境污染已经成为世界普遍关注的热点问题^[1-2],随着经济快速发展,我国水环境恶化现象也逐渐凸显出来^[3]。水环境污染源可以划分为点源污染和非点源污染两大类,根据美国的研究和治理经验,点源污染易于定位、处理和控制在^[4]。20世纪60年代以后,虽然点源水污染得到了大量削减,然而水质恶化问题依然存在^[4]。鉴于点源污染控制已经无法有效改善水污染状况,发达国家研究的重点逐渐转向非点源污染^[2]。美国环保局(Environmental Protection Agency, USEPA)指出:富营养化在美国已经成为危害地表水质最严重的问题,而农业非点源污染是最主要源头^[5]。我国非点源污染研究从20世纪80年代的湖泊富营养化调查开始^[6],起步较晚。目前这方面的研究主要集中在地下水和湖泊方面^[7],近年来流域上的迁移转化规律也逐渐受到重视^[7-9]。然而不论从机理还是模型方面进行研究,非点源污染物迁移转化方面的实测资料仍然非常缺乏,难以支持深入的研究,有待加强和积累^[3,6]。近年来,富营养化问题严重困扰着太湖流域,其中最重要的原因之一就是流域上进入水体的营养物引起藻类疯长,可见,农业非点源的影响不可忽视^[10]。太湖流域面源污染中,氮素对地表径流的污染负荷量达到 2.55×10^4 t/a,其中农业非点源氮素占入湖总氮量超过70%^[1]。笔者以太湖以西丘陵地区农业小流域试验监测资料为基础,探讨了降雨-径流水文过程对小流域氮素迁移的影响,以期以太湖流域及相似地区的农业非点源迁移机制研究和综合治理提供参考。

1 研究区概况

梅林小流域地处宜兴市东南,面积约为73.7 km²,位于

太湖以西约9 km处31°20'N, 119°51'E,属于闭合型一级小流域(图1)。该区年平均降雨量约1 150 mm,降雨集中于6~9月份,汛期雨量占全年降雨总量的45%以上,雨热同季。年最高气温为39.6℃,最低气温为-13.1℃,平均气温15.5℃,全年无霜期239 d。区域内地带性土壤类型为红壤和黄棕壤,并存在少量白土和水稻土。高程变化在4~35 m,其数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)如图1所示。地下水埋深浅,全年变化在地表下0.4~4 m,越接近流域出口和沟渠,埋深越浅。流域内为典型的农业区,土地利用类型以农业用地为主,包括菜地、旱地、板栗林、竹林、茶园、梨园和水稻田等,没有工业生活污水排放。因此,流域出口断面水质状况能反映该地区的农业非点源污染状况。

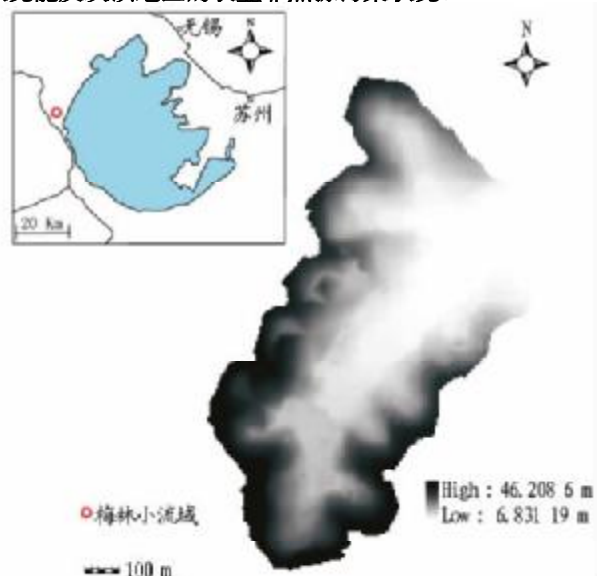


图1 梅林小流域数字高程模型(DEM)和在太湖流域中的位置
Fig.1 The DEM and location in Taihu watershed of Meilin small watershed

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50239030, 50679018); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0717)。

作者简介 刘宏伟(1982-),男,辽宁朝阳人,博士研究生,研究方向:环境水文和分布式水文模拟。*通讯作者。

收稿日期 2009-06-03

2 研究方法

首先,在流域出口河道安装压力式水力传感器和数据采集器,每 10 min 记录 1 次水位数据;然后,将出口河段人工处理成矩形河段,设置量水堰以测量流量。利用翻斗式雨量计和 SL3-1 型雨量记录器连续记录降雨过程,精度为 0.5 mm,发生降雨事件时,利用 ISCO 6712 全尺寸便携式采样仪采集出口水样;最后,钻挖观测井并安装水位计以观测地下潜水位变化。试验中所用气象数据包括温度、湿度、风速和太阳辐射等参数,利用 WS-STD1 型气象站逐小时记录,当发生暴雨事件时采用采样仪编程采样,无雨期间人工定期采样,间隔为 1 周左右。

将采集的水样冷冻保存,送实验室分析总氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)等项目。水样分析各项目选用国家标准方法:水中总氮的测定,采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 GB11894-89;水中铵测定,采用纳氏试剂比色法 GB7479-87;水中硝酸盐氮的测定,采用酚二磺酸分光光度法 GB7480-87。

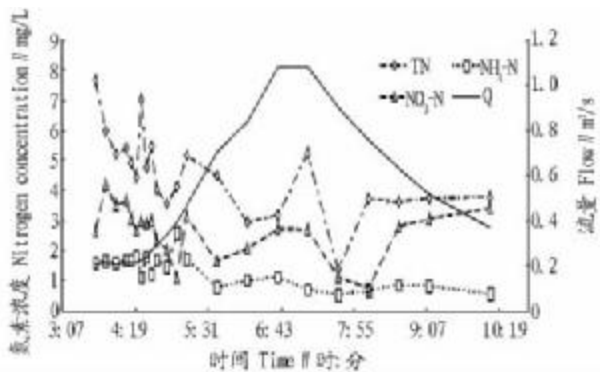


图2 2007年7月10日暴雨过程中径流量与氮素输出过程
Fig.2 The flow and nitrogen output in the storm process on 10th, July 2007

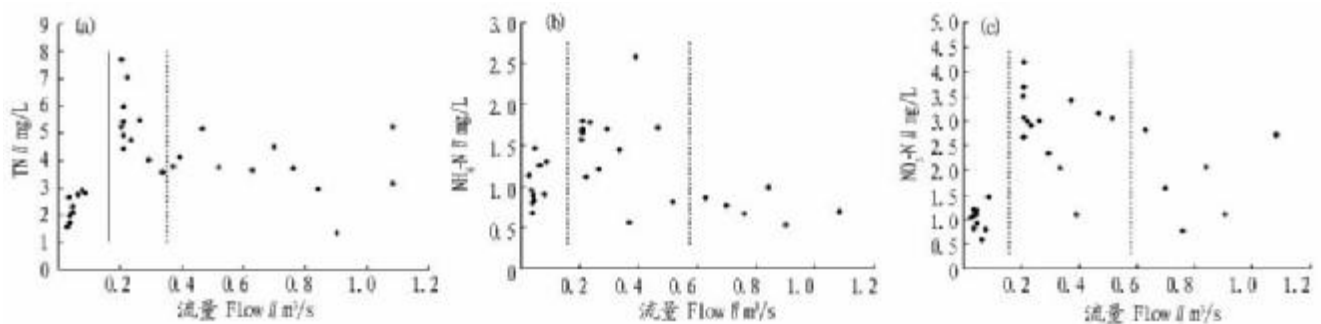


图3 暴雨事件中流量与氮素输出浓度关系

Fig.3 The relationship between the flow and nitrogen output concentration

用,氮素营养物输出稳定且保持在较低水平;另一方面是退水时小流量情况下的氮素输出,这个时候降雨已经结束, NH_4^+ -N的输出主要是在降雨过程中进入水体的 NH_4^+ -N汇流,量低且趋于平稳。②中流量段。在一定降雨径流强度作用下,氮素营养物输出开始活跃起来。这个区段的流量较大,形成这样流量的降雨可以充分表现对流域面上氮素营养物的侵蚀、淋溶和搬运作用。这段中,氮素输出受到降雨强度、雨量和下垫面等复杂因素共同的影响,因此随机性较强,输出浓度变化幅度很大,土壤表面耕作层的有机氮受到侵蚀进入水体引起TN的剧涨,地表化肥中的 NH_4^+ 离子由于容

3 结果与分析

3.1 暴雨事件对氮素输出的影响

3.1.1 暴雨事件中出口径流过程对氮素输出的影响。暴雨事件对流域氮素输出规律有着非常重要的影响。如图2所示,从暴雨径流过程中可以发现:降雨开始后,径流起涨的初期,氮素浓度明显升高,特别是TN和 NH_4^+ -N,TN涨落最陡,对径流响应迅速,硝态氮则反应较平缓。在这段时期内,通过降雨对地表的冲刷,地表积累的肥料、农药及其他含氮有机物迅速随地表径流进入水体,其中包括大量的有机氮和 NH_4^+ -N,从而引起涨水初期污染物浓度升高。随着降雨的进行,径流量增大对氮素的稀释作用和地表营养物的流失,氮素各营养物的浓度逐渐降低。在退水时期,氮素浓度降低到低谷后会有重新增长的反弹期,这种现象一方面是由于产流停止后径流量减小,稀释作用减弱,淋溶携带的氮素营养物浓度容易上升,另一方面是由距离出口较远处的早期产流汇至出口所致。从2007年7月10日暴雨事件和文献[1]中氮素流失结果可以发现:在降雨结束退水一段时间后, NO_3^- -N的浓度会有所上升,这是因为在这个时段流域出口出流成分逐渐变成以壤中流和地下径流补给,而在土壤剖面上 NO_3^- -N是无机氮的主要赋存形式,并容易被淋溶。壤中流和地下径流汇流速度明显慢于地表径流,退水一段,时间后其组分仍在上升,并携带大量硝态氮流失。

3.1.2 暴雨事件中流量与氮素流失的关系。如图3所示,按不同流量大小,TN、 NH_4^+ -N、以及 NO_3^- -N的输出浓度均可分为3个不同区段。①低流量段(流量小于 $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$),当流速较小时,3种形态的无机氮素营养物浓度含量低且较稳定。由于流量较小的洪水过程一方面是由小降雨量和小强度的暴雨事件引起的,在这类降雨过程中,地表径流产流量很少甚至没有地表产流,汇流坦化作用较强,所以对地表侵蚀作用较小,这一阶段氮素营养物的输出主要靠淋溶作

易吸附在土壤颗粒上而较难淋溶,因此也随之增大,含量大且易溶的 NO_3^- -N也迅速以各种形式进入水体。③高流量段。在该段中,径流量较大稀释作用强,TN和 NH_4^+ -N均表现出随流量增大而降低然后趋于稳定的规律, NO_3^- -N则比较散乱,这说明,土壤中硝态氮的来源和汇流速度影响因素较为复杂,掩盖了其随降雨-径流过程的变化规律。

3.2 日降雨径流对氮素输出的影响

3.2.1 逐日径流过程对氮素输出的影响。太湖地区的气候特点决定了其降雨的季节性非常强,总量大强度大的降雨径流过程主要集中在夏季。降雨径流过程对流域中营养物迁

移的影响有两种基本途径:一是通过侵蚀土壤带走颗粒态的氮磷营养物,另一种方式是淋溶营养物并通过产汇流过程带入水体。前者与水土流失关系密切,并且主要发生在土壤表面,后者影响深度较大,且联系着地表水-土壤水-地下水系统。氮素营养物出流的驱动力是流域上的降雨径流水文过程。与降雨产流活跃的夏季相比,在没有或者降雨很难难以产流的时段,氮素流失将非常有限。因此,该研究选取夏季的降雨径流过程进行采样分析。

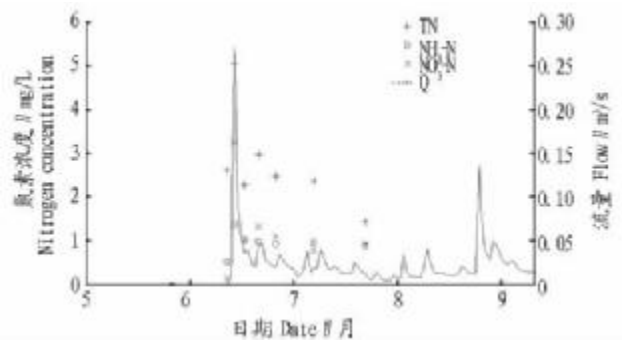


图4 2007年6~9月逐日径流过程与降雨事件发生时的氮素输出浓度

Fig. 4 Nitrogen output concentration of daily runoff process and storm events from June to September, 2007

图4为2007年6~9月的日平均径流过程和发生较大降雨事件过程中的平均氮素流出浓度。当径流量较大时,TN、NH₄⁺-N以及NO₃⁻-N的平均浓度均随之上升;其中TN的涨落幅度较大,NO₃⁻-N变化幅度次之,NH₄⁺-N变化幅度最小。这主要是由于大强度暴雨发生时对流域坡面土壤侵蚀强烈,会带走吸附在土壤上的有机氮,从而造成TN增大幅度明显高于NH₄⁺-N和NO₃⁻-N。根据已有研究结果^[1,11],土壤中NO₃⁻-N含量应该高于NH₄⁺-N,特别是表层以下的土壤剖面上,而且NH₄⁺-N带正电易于被土壤吸附,而带负电荷的NO₃⁻-N却容易淋溶流失。较大的径流量对土壤淋溶能力强,带走硝态氮的能力相应更强一点,而两者浓度相近的情况是由于出流中携带NH₄⁺-N量较高的地表径流组分较大,也就是说地表产汇流作用影响较强势。

3.2.2 日降雨量与流域氮素营养物输出的关系。图5为利用2007年6~9月初7次降雨过程的日降雨量与流域出口氮素平均浓度点绘的关系图,其中,日平均氮素浓度为出流过程多次采样检测的平均值。由于研究区域流域面积较小,流域汇流时间相应较短,降雨径流洪水过程中氮素输出主要在数小时内完成,图5所示的日降雨氮素平均浓度关系反映的是降雨带走流域上氮素的平均能力。从图5中可以看出,日

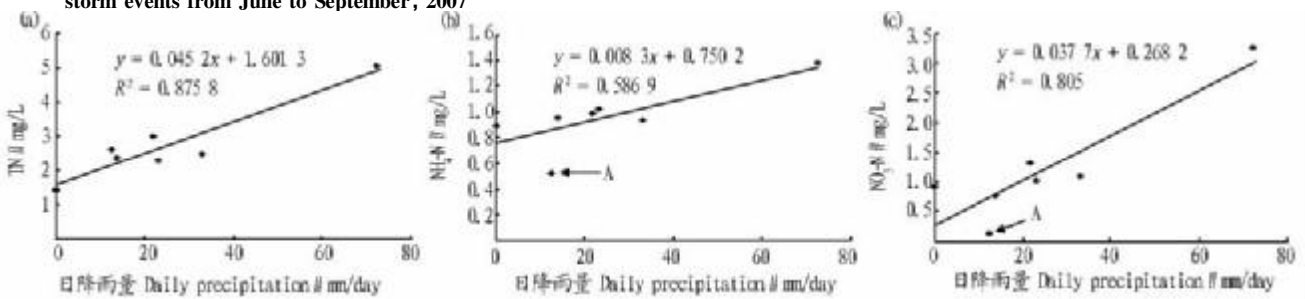


图5 日降雨量与氮素浓度关系

Fig. 5 The relationship of the daily precipitation and the nitrogen concentration

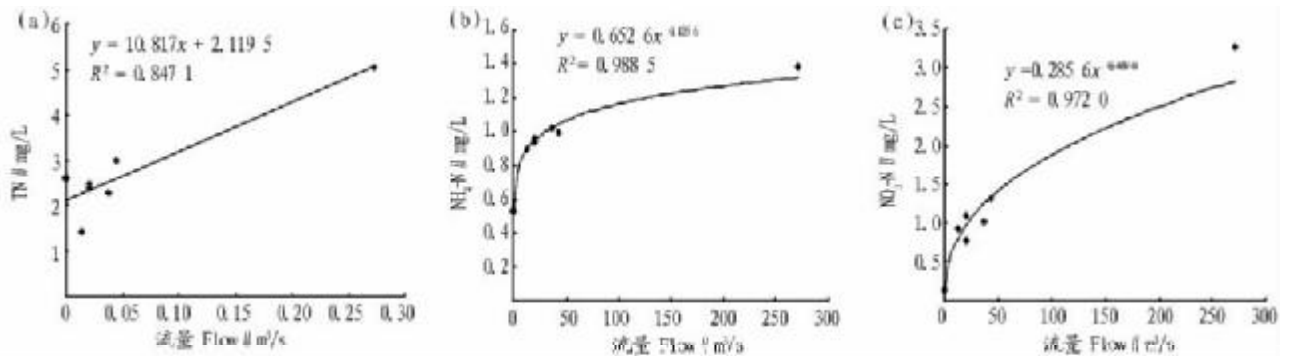


图6 2007年夏季流域出口径流日平均流量与氮素浓度关系

Fig. 6 The relationship between the daily average discharge and the nitrogen concentration at the outlet of the watershed in 2007 summer

降雨量与TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N都有较好的线性相关性,相关系数分别为0.936、0.776和0.897。这说明,降雨量的大小对带走流域上氮素总量有直接的影响,雨量大时,从流域上带到出口的氮素浓度日平均值较高,反之较低。值得注意的是:图5(b)和(c)中明显偏低的测点,记为A点,此点测值为2007年7月13日降雨过程,在这场降雨之前,2007年7月10日发生了当年降雨量最大的暴雨事件(即图5中数值最大的测点),由于A之前的暴雨带走了大量的氮素,造成在这场降雨过程中携带的营养物剧减。因此,连续降雨对氮素营养

物输出有削弱的作用。

3.2.3 流域出口径流日平均流量与氮素输出的关系。从图6可以看出,2007年7次较大降雨日的日平均流量与出流的氮素平均值具有较好的单一对应关系,但是并不像降雨量的直线影响关系。NH₄⁺-N和NO₃⁻-N与日平均流量的关系可以用幂律很好的拟合,而TN与平均流量的关系为直线型。总体来说,随着日平均流量的增大,输入的氮素平均浓度也有所增加。这主要是因为:形成较大径流量的降雨过程通常量大且强度大,对氮素输出的驱动作用强;氮素随水体的输

出主要依靠径流的搬运作用,因而氮素浓度随流量变化表现出一致的变化趋势;由于径流组成来源多样,汇流速度各异,对不同形态的氮素淋溶和搬运效率不同,因而不存在单一的对对应关系。

4 结论

利用太湖流域丘陵区典型农业闭合小流域出口处2006和2007年数场暴雨的氮素监测结果,分析了日径流过程、暴雨洪水事件对氮素营养物输出的影响,讨论了流域出口瞬时流量、日平均流量和流域降雨量与氮素输出的关系,结果表明:

(1)总氮、铵态氮和硝态氮流失日平均浓度随日降雨量和径流量的增大而增大,总氮增大的幅度最大,硝态氮次之,铵态氮的变化幅度略小于硝态氮;连续降雨会显著削减氮素输出浓度。

(2)暴雨过程中,径流起涨初期氮素浓度升高快,TN 涨落最陡,对径流响应迅速, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 幅度也较大,硝态氮则反应较平缓;氮素流失过程峰值出现早于径流峰值;退水阶段氮素浓度会略有上升;退水较长时间后硝态氮浓度有增长趋势,而铵态氮浓度则较低。

(3)暴雨事件过程中,瞬时流量与氮素输出浓度关系按流量大小可分为3区段,1区段为小流量段,总氮、铵态氮和硝态氮浓度低且平稳;2区段为中等流量段,各态氮素流失浓

度变化大;3区段为高流量段,总氮和铵态氮流失浓度显著降低然后逐渐平稳,硝态氮浓度略为降低但变化较大。

参考文献

- [1] 魏林宏,张斌,程训强.水文过程对农业小流域氮素迁移的影响[J].水利学报,2007,38(9):1145-1150.
- [2] PIONKE H B,GBUREK W J,SCHNABEL R R et al. Seasonal flow, nutrient concentrations and loading patterns in stream flow draining an agricultural hill-land watershed[J]. Journal of Hydrology,1999,220:62-73.
- [3] 郭鸿鹏,朱静雅,杨印生.农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J].农业工程学报,2008,24(4):290-295.
- [4] SHARPLEY A N,GBUREK W J,FOLMAR G, et al. Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania[J]. Agricultural Water Management,1999,41(2):77-89.
- [5] USEPA. Environmental indicators of water quality in the United States [R]. EPA 841-R-96-002. USEPA,Office of Water (4503),US Govt. Printing Office, Washington, DC,1996:25.
- [6] 邓雄.农业非点源污染的研究进展、存在的问题及发展[J].中山大学学报:自然科学版,2007,46(2):244-247.
- [7] 陈惟财,陈伟琪,张珞平,等.九龙江流域地表水中硝酸盐来源辨析[J].环境科学,2008,29(6):1484-1487.
- [8] 马立珊,汪祖强,张水铭,等.苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J].环境科学学报,1997,17(1):39-47.
- [9] 王鹏,高超,姚琪,等.太湖丘陵地区农田氮素迁移的时空分布特征[J].环境科学,2006,27(8):1671-1675.
- [10] 逢勇,颜润润,李一平,等.内外源共同作用对太湖营养盐贡献量研究[J].水利学报,2008,39(9):1051-1059.
- [11] 段水旺,章申,陈喜保,等.长江下游氮磷含量变化及其输送量的估计[J].环境科学,2002,21(1):46-53.

(上接第13706页)

气生菌丝发达,但生长慢,背面棕色,分生孢子梗长,分生孢子近球形,光滑,具间生或顶生厚垣孢子。菌株编号:LT23、LT24、LT57。

2.3.4 木霉 1 *Trichoderma* sp. 1. 菌丝绒毛状,气生菌丝极发达,分生孢子产生晚,背面浅棕色,菌丝生长快,分生孢子小梗短而粗,分生孢子球形,光滑。菌株编号:LT4~5、LT8~11、LT17、LT20、LT58。

2.3.5 木霉 2 *Trichoderma* sp. 2. 菌丝洁白致密,分生孢子梗团块状,气生菌丝不发达,背面黄色,厚垣孢子较少。菌株编号:LT12~14、LT19。

2.3.6 木霉 3 *Trichoderma* sp. 3. 菌落绒状,背面深黄褐色。具大量球形、椭圆形或柱状厚垣孢子,分生孢子近球形,卵形,椭圆形,淡绿色。菌株编号:LT42。

3 结论与讨论

该研究可得到以下结论:①信阳裸子植物枝栖真菌由半知菌与接合菌构成,其中半知菌占多数;②木霉为裸子植物枝栖常见真菌,其种类多,分布广;③信阳地区水杉枝栖真菌种类最丰富,龙柏枝栖真菌种类较少。

木霉在豫南裸子植物体上分布普遍,种类多,由于此类真菌有重寄生性,对植物病原菌有重要拮抗作用^[9],所以,这类真菌是重要的自然资源,具有防治裸子植物枝干病害的潜

力,值得开发利用。该研究仅对信阳裸子植物枝栖真菌种类、分布进行初步研究,有关这些真菌的生态功能如何,有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] 宋瑞清,黄永青.红松枝栖真菌群落结构(Ⅲ)[J].东北林业大学学报,2001,29(1):108-117.
- [2] 卢东升,吴小芹.茶园有益微生物及其微生态效应研究进展[J].信阳师范学院学报,2005,18(1):117-120,124.
- [3] 卢东升,吴小芹.豫南茶园树栖真菌群落结构研究[J].生态学杂志,2005,24(10):1151-1154.
- [4] 邵力平,沈瑞祥,张素轩.真菌分类学[M].北京:中国林业出版社,1984:1-346.
- [5] 魏景超.真菌鉴定手册[M].上海:上海科学技术出版社,1979:405-650.
- [6] 中国科学院神农架真菌地衣考察队.神农架真菌与地衣[M].北京:世界图书出版公司,1989:1-514.
- [7] 中国科学院植物研究所《常见与常用真菌》编写组.常见与常用真菌[M].北京:科学出版社,1978:143-253.
- [8] CAMPBELL R P. Lant microbiology [M]. Edward Arnold, Australia: The Castlefield Press, 1985:1-152.
- [9] PABELLÓN P. Biological control of *Sclerotinia sclerotiorum* attacking soybean plants. Degradation of the cell walls of this pathogen by *Trichoderma harzianum* (BAFC 742)[J]. Mycopathologia,1998,142(3):153-160.
- [10] 徐大敏,刘秀敏,刘雪峰.偃松枝栖真菌的种群结构研究[J].西部林业科学,2008,37(1):25-40.
- [11] DOU C H, CHEN Y W. Dynamic study on soil fungi population in artificial vegetation areas of Shapotou in Ningxia[J]. Agricultural Science & Technology,2008,9(3):145-148.