

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.02.001

滁州花山水文实验流域氮流失特征分析

王建群, 郭 昆, 刘松平, 王 洋

(淮海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以滁州花山水文实验流域为研究对象,研究不同土地利用类型中各种形态的氮随径流流失的特征。基于 2012 年 10 月—2013 年 9 月滁州花山水文实验流域氮素实验观测数据,对流域的氮随径流流失的特征进行了分析。结果表明:林地比重较大的集水区域径流中的 TN 质量浓度和 NO_3^- -N 质量浓度较高,农田比重较大的集水区域径流中的 NH_3 -N 质量浓度较高;在林地面积比例较大集水区域, TN 质量浓度与 NO_3^- -N 质量浓度有较好的相关性;而在耕地面积比例较大的集水区域, TN 质量浓度与 NH_3 -N 质量浓度表现出较好的相关性。对于嵌套子流域, NO_3^- -N 质量浓度沿河道往下游随集水区域的增大和森林覆被比例的减少而呈逐渐递减趋势;在农田非施肥季节, 各个月的 TN 质量浓度空间上自上而下随森林覆被比例的减少而呈逐渐递减趋势, 而 NH_3 -N 质量浓度变化较小;在施肥季节, TN 质量浓度随 NH_3 -N 质量浓度的上升而上升。研究还发现:研究区域汪郢左支断面和军事牌断面的集水区域林地比重高达 99.92% 以上, 虽然人类活动较少, 但 TN 质量浓度较高, 分别为 2.830 mg/L 和 4.028 mg/L, 高于集水区域农田比重较大的竹园沟断面和新坝断面(两断面农田比重分别为 39.59% 和 35.63%), 分别是竹园沟断面和新坝断面的 1.42~2.51 倍、2.02~3.57 倍;这一事实与人们通常的认识不一致, 值得进一步深入研究。

关键词:水文实验流域;氮流失;非点源污染;土地利用

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)02-0001-06

Analysis of characteristics of nitrogen loss in Huashan hydrological experimental watershed

WANG Jianqun, GUO Kun, LIU Songping, WANG Yang

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of nitrogen loss with runoff under different land use patterns in Huashan hydrological experimental watershed are studied. Based on the data of sample measurement of nitrogen mass concentrations from October, 2012 to September, 2013 in Huashan hydrological experimental watershed, the characteristics of nitrogen loss with runoff are analyzed. The results show that, there are higher total nitrogen mass concentration and nitrate nitrogen mass concentration in the runoff of the large proportion of the forest catchment as well as higher ammonia nitrogen mass concentration in the runoff of the large proportion of the farmland catchment. The mass concentration of total nitrogen highly correlates with the mass concentration of nitrate nitrogen in catchments with a higher proportion of forest, while the mass concentration of total nitrogen highly correlates with the mass concentration of ammonia nitrogen in catchments with a higher proportion of farmland. For the nested subcatchments the mass concentration of nitrate nitrogen decreased along the river channel downstream with the increase of catchment area and the reduction of forest coverage; in non-fertilization seasons, the mass concentration of total nitrogen decreased along the river channel downstream with the increase of catchment area and the reduction of forest coverage, and the mass concentration of ammonia nitrogen has a small change, while in fertilization seasons, the mass concentration of total nitrogen increased with the increase of the mass concentration of ammonia nitrogen. The study found that, in the catchment of the Junshipai section and the Wangyingzuozhi section, the

基金项目:水利行业公益性科研专项(201201026)

作者简介:王建群(1960—),男,教授,博士,主要从事流域水文模拟及水资源规划管理研究。E-mail: wangjq@hhu.edu.cn

proportion of forest is as high as more than 99.92% and human activities are quite limited, however, the mass concentration of total nitrogen in these sections are 2.830 mg/L and 4.039 mg/L respectively, being 1.42 ~ 2.51 times and 2.02 ~ 3.57 times higher than the one in the catchment of Zhuyuangou section and Xinba section respectively, where the proportion of farmland is 39.59% and 35.63% respectively. This fact is inconsistent with the common knowledge of people, which is worth further studying.

Key words: hydrological experimental watershed; nitrogen loss; non-point source pollution; land use

综合反映人类活动对自然环境作用的土地利用类型、结构等,是影响水土流失、氮磷营养盐流失的主要因素,也是导致非点源污染的主要原因^[1]。土地利用方式对氮磷营养盐的流失和面源污染的影响,一直是国内外研究的热点。文献[2-4]研究表明,林地、草地等与污染物浓度存在负相关关系,文献[5]研究认为以林地和草地为主的小流域的地表水水质明显好于以耕地为主的小流域。文献[6]研究认为,高密度的城市和农业斑块更容易使水质恶化,完整的、复杂形状的并具有较高比例的森林斑块更容易净化水质。文献[7]研究发现以林地斑块为主要景观类型的小流域水质好于以草地斑块为主要景观类型的小流域。文献[8]对深圳坪山河流域1990年和2000年的土地利用结构变化情况进行分析,利用长周期水文影响评价模型 L-THIA,以 TP、TN 为评价指标,对非点源污染负荷进行分析,结果表明由于耕地减少、建设用地增加等原因,坪山河流域各用地类型的非点源污染所占比例发生变化,由1990年的以耕地、园地污为主,逐渐变化为2000年以建设用地产污为主。文献[9]以自然降雨条件下澄江尖山河小流域为研究对象,认为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 输出量表现出农田和人工林大于次生林和灌草丛,植被覆盖度越高, $\text{NH}_3\text{-N}$ 随径流流失的越小;次生林和灌草丛小区径流中的水溶态氮浓度较大并以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为主。文献[10]作者于2004—2005年对三峡库区内长江一级支流曲溪的水体 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量进行了连续监测,采用划分子流域的方法,并利用 SPSS (statistical product and service solutions) 等工具,分析了该流域异质景观条件下溪流水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度的变化特征,认为水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度与流域土地利用类型有关, $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度与流域的农用地面积有很好的正相关关系,而与林地呈负相关关系。文献[11]选取三峡库区典型支流小江流域为研究对象,在 L-THIA 模型的基础上,分析小江流域非点源污染物 TN 和 TP 的负荷量随土地利用方式改变而产生的时空变化特征,结果表明:旱地的污染物负荷量最大,1995—2007年,随着旱地面积的大幅增加,污染物负荷量明显增加。文献[12]选取亚热带中尺度流域九龙江为研究对象,运用空

间分析与统计分析法,从全流域和河岸缓冲区尺度分别建立了九龙江流域2002年和2007年土地利用、景观格局与河流水质的关联,结果表明:建设用地面积比例与 BOD_5 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 质量浓度呈负相关;林地面积比例与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 质量浓度呈负相关;耕地面积比例与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 质量浓度呈负相关。从以上的研究可以看出,土地利用的变化对氮磷营养盐的流失和非点源污染的影响已成水环境领域研究的重要课题。但以小流域为整体单元,对不同土地利用类型的各种形态的氮的输出特征还缺少深入的研究,且现有的研究还存在结论不一致的问题,如文献[9]与文献[10-11]。本文以滁州花山水文实验流域为研究对象,研究不同土地利用类型的各种形态的氮的流失特征,以期揭示此流域不同土地利用方式非点源污染物输出规律,为该地区合理利用土地资源、控制水土流失和面源污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域花山水文实验流域位于安徽省东部城市滁州市域内,范围在东经 $118^{\circ}8'8'' \sim 118^{\circ}16'50''$ 、北纬 $32^{\circ}13'16'' \sim 32^{\circ}18'52''$ 之间,距滁州市主城区 10 km 处,流域出口胡庄断面集水面积 80.13 km^2 。流域内河系呈标准的扇形,胡庄测流断面以上有 3 条支流和 1 条小沟汇入,分别为东源、中源、西源和竹园沟。流域水系见图 1。研究区域气候属于温带半湿润季风气候,冬季干旱少雨,夏季高温多雨,四季分明,气候温和,平均气温 $14 \sim 15^{\circ}\text{C}$,多年平均 E601 水面蒸发 1100 ~ 1300 mm,多年平均降水量 1048.5 mm。

花山水文实验流域为丘陵地区,地形复杂,主要以乡村景观为主,农田、塘坝、林地等交错分布。本研究于 2013 年 1 月开展实地调查和遥感资料调查,结果表明,研究区域土地利用/覆被面积比例分别为:林地 68.33%,水田 14.64%,旱地 8.02%,裸地 4.85%,水体 2.84%,建筑用地 1.32%,涉及属滁州市南谯区施集镇的丰山、花山、龙蟠、荣誉、杨家饭店、河东等 6 个行政村 3533 户 12196 人,其中常住人口 9944 人;流域内有牛 27 头、猪 1150 头、羊

3600 只、土鸡 76420 只、肉鸡 197800 只、鸭 118500 只；农作物主要有水稻、小麦、油菜、棉花、玉米、花生等；经济以种养殖业为主，畜禽养殖业是农民收入的重要来源。研究区域无工业，氮的主要来源是农业化肥、人畜粪便、大气氮沉降、生物固氮、种子等。

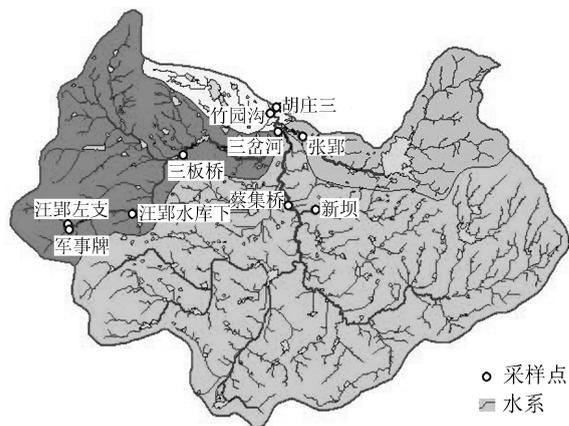


图1 花山水文实验流域水系与子流域及采样点

1.2 地理信息提取

研究中使用到的空间数据主要包括数字高程模型 DEM、水系图、子流域划分、土地利用图等，由项目组直接从资源三号卫星影像中提取。基于资源三号卫星遥感影像进行土地利用信息的提取，将区域土地利用类型划分为常绿林、落叶林、水田、旱地、水体、裸地及建筑用地，并运用混淆矩阵对土地利用图进行了精度评价，总体精度为 92.04%，Kappa 系数为 0.9030。水系与子流域划分、土地利用情况分别见图 1、图 2。

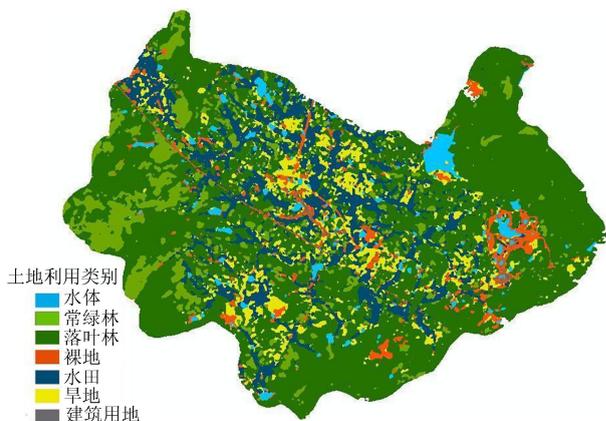


图2 花山水文实验流域土地利用情况

1.3 监测断面布置

根据花山水文实验流域的下垫面特征和径流监测站点的位置及研究的目的，在全流域干支流上共布置了 10 个氮素监测断面，其中西源子流域为重点监测子流域，自上而下分别布置了军事牌、汪郢左支、汪郢水库下、三板桥、三岔河等 5 个监测断面，汪郢左支断面在西源支流上与军事牌断面并联；竹园沟子流域布置了 1 个监测断面竹园沟；中源子流域

布置了 2 个监测断面——新坝、蔡集桥，其中新坝监测断面布置在中源干流的支流上；东源子流域布置了 1 个监测断面张郢；花山流域出口断面为胡庄断面。断面位置参见图 1。

利用 ArcGIS 对土地利用图进行统计分析得各监测断面集水区土地利用信息，见表 1。

表1 各监测断面集水区土地利用类型面积比例统计结果

监测断面	集水面积/km ²	水体/%	林地/%	裸地/%	水田/%	旱地/%	建筑用地/%
军事牌	1.69	0.00	99.92	0.00	0.01	0.07	0.00
汪郢左支	0.72	0.02	99.98	0.00	0.00	0.00	0.00
汪郢水库下	2.94	0.29	99.26	0.23	0.04	0.18	0.00
三板桥	12.58	1.11	79.78	3.14	12.23	2.83	0.91
三岔河	16.14	1.62	73.19	3.16	15.99	5.31	0.73
竹园沟	2.63	7.31	49.26	3.61	30.54	9.05	0.23
新坝	2.23	1.35	61.51	1.30	27.15	8.48	0.21
蔡集桥	44.07	2.36	65.33	6.02	14.95	9.51	1.83
张郢	8.82	6.32	80.46	2.19	6.01	4.97	0.05
胡庄	80.13	2.84	68.33	4.85	14.64	8.02	1.32

1.4 样品采集与分析

项目组于 2012 年 10 月 1 日—2013 年 10 月 1 日，每半个月对布置的 10 个采样断面进行监测采样，暴雨期间适当加测，监测的项目有 TN、NH₃-N、NO₃⁻-N、COD_{Mn} 等。每次每样点采水样 500 mL，用聚乙烯塑料瓶密封带回实验室及时进行测定。TN 质量浓度利用“过硫酸钾硝解-紫外分光光度法”测定；NH₃-N 质量浓度采用纳氏比色法进行测定；NO₃⁻-N 质量浓度采用紫外分光光度法测定。将每个监测项目每个月的月初、月中及加测、下月月初监测的数据进行时间间隔加权平均，作为该监测项目月平均值；将 2012 年 10 月—2013 年 9 月共 12 个月的监测项目月平均值进行算术平均，作为该监测项目的年平均值，计算结果见表 2。

表2 监测项目监测期年平均值统计结果

监测断面	林地/%	耕地/%	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3 \text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
军事牌	99.92	0.08	2.830	2.496	0.069	2.363
汪郢左支	99.98	0.01	4.028	3.626	0.074	1.719
汪郢水库下	99.26	0.22	1.688	1.307	0.069	2.542
三板桥	79.78	15.06	1.230	0.692	0.094	3.839
三岔河	73.19	21.30	0.881	0.451	0.102	4.169
竹园沟	49.26	39.59	2.076	0.548	0.452	5.742
新坝	61.51	35.63	1.196	0.404	0.300	4.933
蔡集桥	65.33	24.46	0.926	0.471	0.102	4.293
张郢	80.46	10.98	1.102	0.669	0.140	4.058
胡庄	68.33	22.66	0.931	0.491	0.118	4.409

1.5 研究区域不同月份降雨量统计

研究区域雨量观测资料来源于水利行业公益性科研专项(201201026)参加单位安徽省滁州水文局。对研究区域各站点不同月份降雨量进行统计，并进行面积加权平均，计算结果见表 3。

表3 研究区域不同月份降雨量统计结果

月份	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
降雨量(mm)	37.12	34.05	54.9	34.74	52.7	34.19	21.57	118.84	157.19	253.96	65.61	131.47

2 结果与分析

2.1 实验流域年尺度氮输出特征

由监测断面监测项目年平均值统计表(表2)可以看出:

a. 林地比重较大的集水区域径流中的 TN 和 NO_3^- -N 质量浓度较高,农田比重较大的集水区域径流中 NH_3 -N 质量浓度较高。例如军事牌和汪郢左支断面集水区域林地比重较大,分别为 99.92% 和 99.98%;竹园沟和新坝断面集水区域农田比重较大,分别为 39.59% 和 35.63%。军事牌和汪郢左支断面的 TN 质量浓度分别为 2.830 mg/L 和 4.028 mg/L,分别是竹园沟和新坝断面的 1.42 ~ 2.51 倍和 2.02 ~ 3.57 倍; NO_3^- -N 质量浓度分别为 2.496 mg/L、3.626 mg/L,分别是竹园沟、新坝断面的 4.55 ~ 6.15 倍和 6.62 ~ 8.93 倍。而竹园沟、新坝断面的 NH_3 -N 质量浓度分别为 0.393 mg/L 和 0.300 mg/L,分别是军事牌和汪郢左支断面的 5.31 ~ 5.70 倍和 4.05 ~ 4.35 倍。

b. 汪郢左支断面和军事牌断面集水区域林地比重高达 99.92% 以上,人类活动较少, COD_{Mn} 质量浓度分别为 1.72 mg/L、2.36 mg/L,分别达到 I 类水和 II 类水标准,但 TN 输出量较高,甚至高于集水区域农田比重较大的竹园沟、新坝断面。这一现象与人们通常的认识不一致,应该引起重视。

根据表2中的数据,建立 NO_3^- -N 质量浓度与林地面积比例关系(图3)和 NH_3 -N 质量浓度与耕地面积比例关系(图4)。由图3、图4可以看出, NO_3^- -N 质量浓度与集水区域林地面积呈正相关关系, NH_3 -N 质量浓度与集水区域耕地面积呈正相关关系。

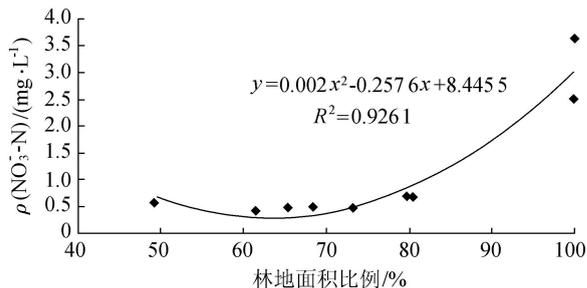


图3 NO_3^- -N 质量浓度与林地面积比例关系

2.2 实验流域月尺度氮输出特征

集水区域林地比重较大的监测断面军事牌和汪郢左支断面的 TN、 NH_3 -N 和 NO_3^- -N 月平均质量浓度过程见图5(a)、图5(b),集水区域农田比重较大

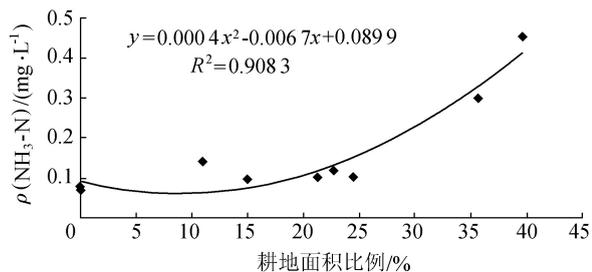


图4 NH_3 -N 质量浓度与耕地面积比例关系

的监测断面竹园沟和新坝断面的 TN、 NH_3 -N 和 NO_3^- -N 月平均质量浓度过程见图5(c)、图5(d)。

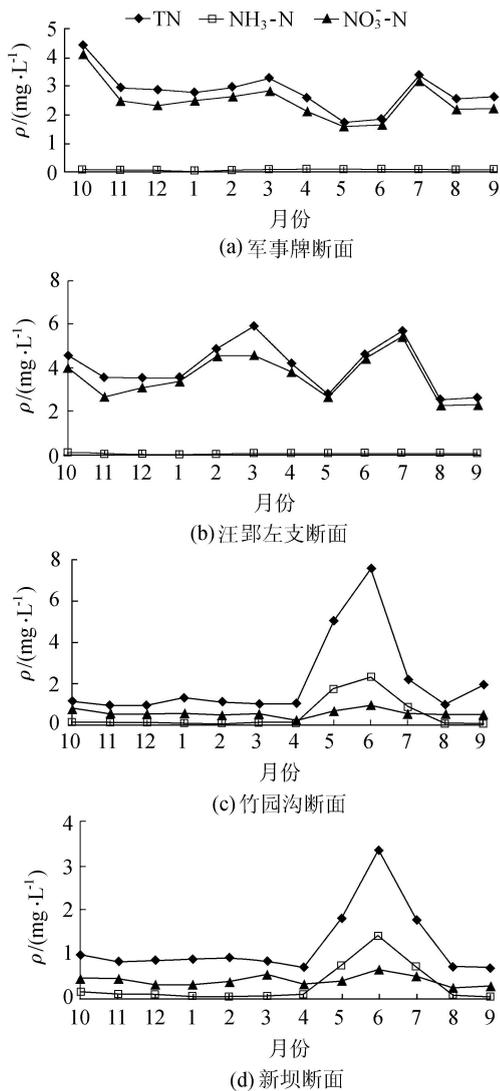


图5 监测断面氮素月平均质量浓度过程

由图5可以看出:

a. 集水区域林地比重较大的监测断面军事牌和汪郢左支断面的 TN 月平均质量浓度过程为双峰型,其中第1个峰值出现在3月份左右,第2个峰值

出现在7月份左右,与雨量峰值一致;TN质量浓度与 NO_3^- -N质量浓度变化趋势一致, NO_3^- -N比例高达81%~96%, NH_3 -N比例仅为0.4%~5.2%。

b. 集水区域耕地比重较大的监测断面竹园沟和新坝断面的TN月平均质量浓度过程为单峰型,峰值出现在6月份,与农业施肥(主要是水稻田施肥)时间一致;TN质量浓度与 NH_3 -N质量浓度变化趋势一致。 NO_3^- -N比例平均为40%左右, NH_3 -N比例平均为13%~17%;受施肥和降水的影响,在5—7月, NH_3 -N比例高达30%~42%,而 NO_3^- -N比例仅为12%~27%。

对各监测断面TN质量浓度与 NO_3^- -N质量浓度或 NH_3 -N质量浓度的相关关系进行分析,见图6。

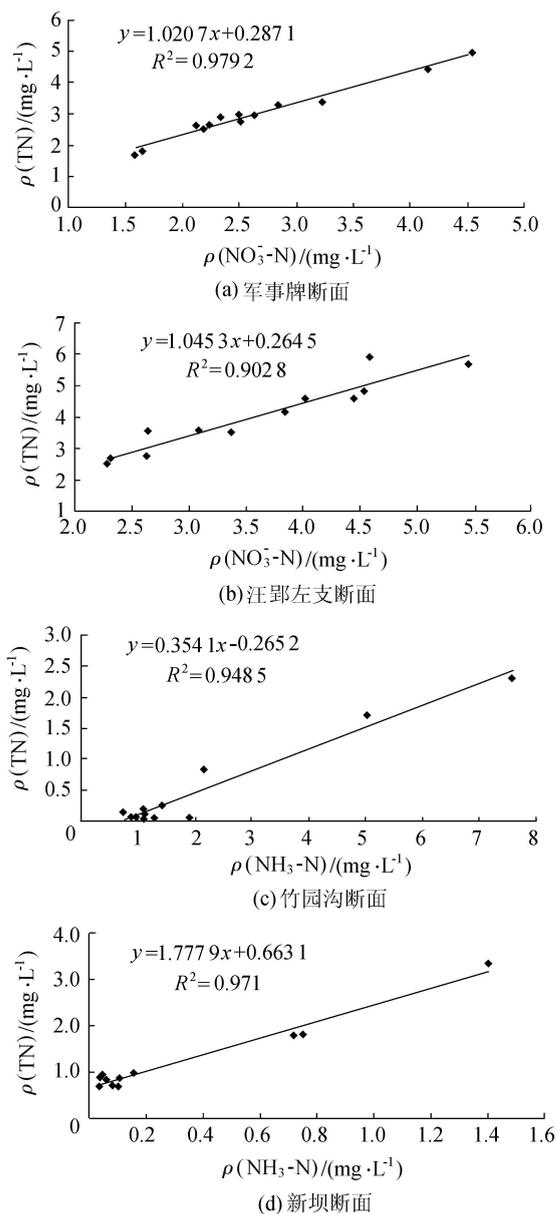


图6 各监测断面TN质量浓度与 NO_3^- -N或 NH_3 -N质量浓度相关关系

由图6可知,在林地面积比例较大区域TN质

量浓度和 NO_3^- -N质量浓度表现出较好的相关性,而在耕地面积比例较大的区域,TN质量浓度与 NH_3 -N质量浓度表现出较好的相关性。

2.3 嵌套子流域氮输出特征

为了更深入地探讨氮的输出规律,将对重点监测的西源子流域沿西源干流自上而下排列的4个嵌套断面的 NO_3^- -N、 NH_3 -N和TN月平均质量浓度变化过程进行比较,见图7。

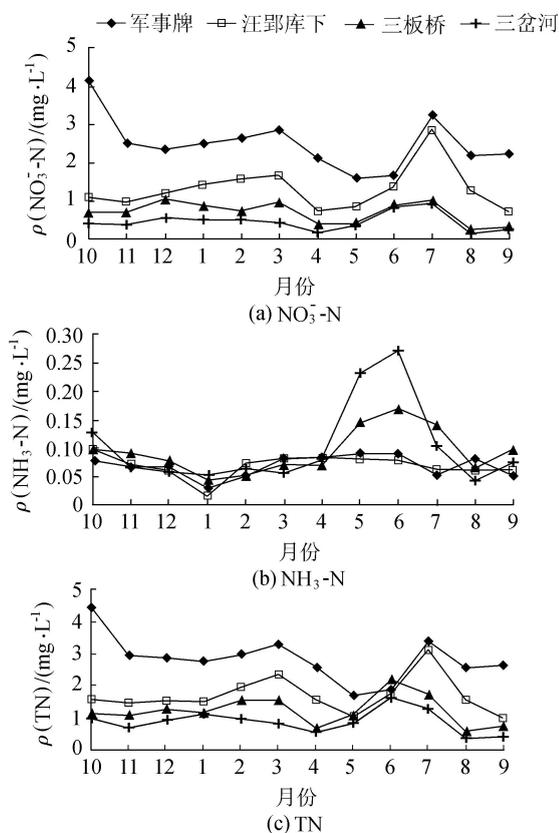


图7 西源嵌套子流域 NO_3^- -N、 NH_3 -N、TN月平均质量浓度变化过程比较

从图7可以看出:

a. 西源流域沿西源干流自上而下排列的军事牌、汪郢水库下、三板桥、三岔河等4个嵌套断面集水区域的森林覆被比例自上而下逐渐递减,分别为99.92%、99.26%、79.78%、73.19%,相应各个月的 NO_3^- -N质量浓度空间上自上而下呈减小趋势(图7(a))。这表明, NO_3^- -N质量浓度与森林覆被有关,在西源沿河道往下游随集水区域的增大与森林覆被比例的减少而呈逐渐递减趋势。

b. 在农田非施肥季节,西源流域各采样点的 NH_3 -N质量浓度变化较小,基本一致。军事牌断面、汪郢水库下断面集水区域的农田面积比例小于0.22%,汪郢水库下断面以下流域为农田区域,下游的三板桥、三岔河2断面集水区域农田比例分别为15.06%、21.30%,5月底、6月初正是当地种植的杂

交水稻插秧、返青季节,水稻田施用底肥和返青肥,由于农田施肥导致下游的三板桥、三岔河 2 个采样断面在 5 月和 6 月 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度较大,而在上游林区的军事牌、汪郢水库下断面, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度保持稳定不变(图 7(b))。这说明, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度在 5 月、6 月的突变是农田化肥的使用导致的。

c. 在农田非施肥季节,与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 一样,各个月的 TN 质量浓度在空间上自上而下随森林覆被比例的减少而呈逐渐递减趋势;而在施肥季节,集水区域农田比例较大的三板桥、三岔河 2 个断面的 TN 质量浓度接近或超过上游断面的 TN 质量浓度(图 7(c))。

3 结 语

基于 2012 年 10 月—2013 年 9 月滁州花山水文实验流域氮素实验观测数据,对流域的氮随径流流失的特征进行了分析,得出如下结论:

a. 林地比重较大的集水区域径流中的 TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度较高,农田比重较大的集水区域径流中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度较高。

b. 在林地面积比例较大区域, TN 质量浓度和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度表现出较好的相关性;而在耕地面积比例较大的区域, TN 质量浓度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度表现出较好的相关性。

c. 对于嵌套子流域, $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度沿河道往下游随集水区域的增大与森林覆被比例的减少而呈逐渐递减趋势;在农田非施肥季节,与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 一样,各个月的 TN 质量浓度在空间上自上而下随森林覆被比例的减少而呈逐渐递减趋势;而在施肥季节, TN 质量浓度随 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的上升而上升。对于研究区域西源流域,在农田非施肥季节,西源流域各采样断面的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度基本是一致的;而在施肥季节,集水区域农田比例较大的三板桥、三岔河两断面的 TN 质量浓度接近或超过上游断面的 TN 质量浓度。

d. 研究区域汪郢左支断面和军事牌断面集水区域林地比重高达 99.92% 以上,人类活动较少, COD_{Mn} 质量浓度分别为 1.72 mg/L 和 2.36 mg/L, 分别达到Ⅰ类水和Ⅱ类水标准,但汪郢左支断面和军事牌断面的 TN 质量浓度较高,分别为 2.830 mg/L、4.028 mg/L, 高于其集水区域农田比重较大的竹园沟断面和新坝断面(分别为 39.59% 和 35.63%), 分别是竹园沟断面和新坝断面的 1.42 ~ 2.51 倍、2.02 ~ 3.57 倍。人类活动较少、林地比重较大的集水区域径流中的 TN 质量浓度高于农田比重较大的集水区域径流中 TN 质量浓度,这一事实与人们通常的认识不一致,值得进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 于兴修,杨桂山,王瑶. 土地利用/覆被变化的环境效应研究进展与动向[J]. 地理科学, 2004, 24(5): 627-633. (YU Xingxiu, YANG Guishan, WANG Yao. Advances in researches on environmental effects of land use/cover change[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(5): 627-633. (in Chinese))
- [2] PRAKASH B, LAWRENCE B, GRAEME L. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries[J]. Environmental Management, 1999, 23(4): 539-549.
- [3] WANG X. Integrating water quality management and landuse planning in a watershed context [J]. Journal of Environmental Management, 2001, 61(1): 25-36.
- [4] TONG S T Y, CHEN Wenli. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 66(4): 377-393.
- [5] 李俊然,陈利顶,郭旭东,等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506-510. (LI Junran, CHEN Liding, GUO Xudong, et al. Effect of land use structure on non-point source pollution[J]. China Environmental Science, 2000, 20(6): 506-510. (in Chinese))
- [6] LEE S W, HWANG S J, LEE S B, et al. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 92: 80-89.
- [7] 郝敬锋,刘红玉,胡俊纳,等. 南京东郊城市湿地水质多尺度空间分异[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1799-1804. (HAO Jingfeng, LIU Hongyu, HU Junna, et al. Multi-scale spatial heterogeneity of urban wetland water quality in east suburb of Nanjing City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1777-1804. (in Chinese))
- [8] 李杨,马晓明. 深圳坪山河流域土地利用变化对流域非点源污染负荷的影响[J]. 水资源保护, 2012, 28(2): 42-45. (LI Yang, MA Xiaoming. Impacts of land-use change on non-point source pollution load in Pingshan River Watershed in Shenzhen City[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(2): 42-45. (in Chinese))
- [9] 宋泽芬,王克勤,杨云华,等. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型面源污染输出特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 98-101. (SONG Zefen, WANG Keqin, YANG Yunhua, et al. Characteristics of non-point source pollution output of different lands utilization pattern in small watersheds in Jianshan River, Chengjiang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 98-101. (in Chinese))

(下转第 29 页)

3 结 语

a. 河流水安全是一个兼具随机性与模糊性的概念,为全面考虑这两种不确定性,可以将云模型引入河流水安全评价。在云模型计算过程中,确定度向量的标准化步骤是不可缺少的。通过与已有的模糊综合模型和集对分析模型比较,发现云模型是一种可行的评价方法。

b. 中运河 2012 年水安全评价结果为“良”,这表明中运河能够较好地承担南水北调东线工程的输水任务,并为苏北地区经济社会可持续发展服务。为了进一步提升中运河的水安全等级,应加强宿迁、淮安两市的防洪工程建设,提高河流行洪能力。

参考文献:

[1] 叶守泽,詹道江. 工程水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007:38-69.

[2] 张翔,夏军,贾绍凤. 水安全定义及其评价指数的应用[J]. 资源科学,2005,27(3):145-149. (ZHANG Xiang, XIA Jun, JIA Shaofeng. Definition of water security and its assessment using water poverty index [J]. Resources Science,2005,27(3):145-149. (in Chinese))

[3] 韩宇平,阮本清,谢建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学,2003,25(4):37-42. (HAN Yuping, RUAN Benqing, XIE Jiancang. Multi-objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation[J]. Resources Science, 2003,25(4):37-42. (in Chinese))

[4] 李文君,邱林,陈晓楠. 基于集对分析与可变模糊集的

河流生态健康评价模型[J]. 水利学报,2011,42(7):775-782. (LI Wenjun, QIU Lin, CHEN Xiaonan. Assessment model for river ecology health based on set pair analysis and variable fuzzy set [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(7):775-782. (in Chinese))

[5] 帅青燕,何亚伯. 基于云模型的坝基岩体质量综合评价[J]. 东南大学学报:自然科学版,2013,43(1):54-58. (SHUAI Qingyan, HE Yabo. Comprehensive evaluation on rock quality of dam foundation based on cloud model [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013,43(1):54-58. (in Chinese))

[6] 刘德地,陈晓宏,楼章华. 基于云模型的降雨时空分布特性分析[J]. 水利学报,2009,40(7):850-857. (LIU Dedi, CHEN Xiaohong, LOU Zhanghua. Analysis on characteristics of spatial-temporal precipitation distribution based on cloud model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009,40(7):850-857. (in Chinese))

[7] 丁昊,王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J]. 环境科学学报,2013,33(1):251-257. (DING Hao, WANG Dong. The evaluation method of water eutrophication based on cloud model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013,33(1):251-257. (in Chinese))

[8] 李德毅,杜鹃. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社,2005:84-184.

[9] 卢敏,张展羽,石月珍. 集对分析法在水安全评价中的应用研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(5):505-508. (LU Min, ZHANG Zhanyu, SHI Yuezhen. Application of set pair analysis to evaluation of water safety [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(5):505-508. (in Chinese))

(收稿日期:2014-08-30 编辑:徐娟)

(上接第6页)

[10] 冯明磊,胡荣桂,许克翠,等. 三峡小流域水体 NO₃-N 含量变化特征及其影响因素研究[J]. 环境科学,2008,29(1):13-18. (FENG Minglei, HU Ronggui, XU Kecui, et al. Variations and influencing factors of nitrate nitrogen concentration in water in a small watershed of Three Gorges Area [J]. Environmental Science, 2008, 29(1):13-18. (in Chinese))

[11] 郎海鸥,王文杰,王维,等. 基于土地利用变化的小江流域非点源污染特征[J]. 环境科学研究,2010,23(9):1158-1166. (LANG Haiou, WANG Wenjie, WANG Wei, et al. Effect of land use change on spatial-temporal characteristics of non-point source pollution in Xiaojiang Watershed [J]. Research of Environmental Sciences, 2010,23(9):1158-1166. (in Chinese))

[12] 黄金良,李青生,洪华生,等. 九龙江流域土地利用景观格局-水质的初步关联分析[J]. 环境科学,2011,32

(1):64-71. (HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HONG Huasheng, et al. Preliminary study on linking land use & landscape pattern and water quality in the Jiulong River Watershed [J]. Environmental Science, 2011, 32(1):64-71. (in Chinese))

(收稿日期:2014-09-09 编辑:彭桃英)

