

文章编号: 1008 - 2786 - (2017)6 - 808 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000281

## 天山北坡中段云杉林地地表水氮磷含量特征

谢 锦<sup>1,3,4</sup>, 常顺利<sup>1\*</sup>, 张毓涛<sup>2</sup>, 李 翔<sup>2</sup>, 李吉玖<sup>2</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆林业科学院 森林生态研究所, 乌鲁木齐 830063;

3. 中国科学院 森林生态与管理重点实验室/中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;

4. 中国科学院大学, 北京, 100049)

**摘 要:** 森林的结构对地表水的化学成分具有强烈的影响, 量化分析森林结构与水质变化的关系很有必要。为探究天山云杉森林地表水的氮磷含量特征及其影响因素, 本文在天山北坡中段的板房沟林场按林地类型、林龄、郁闭度、抚育方式的不同分别设置坡面径流观测场共 13 处, 在雨后测定各径流观测场地表水中总氮和总磷含量并分析比较。结果表明: ①林地类型对天山云杉森林地表水氮磷含量有重要的影响, 人工林、灌木林、天然林三种样地的地表水氮磷含量均显著低于裸地 ( $P < 0.05$ ); ②群落发育阶段对地表水氮磷含量也有重要的影响。在天然林系列样地中, 郁闭度相同(均为 0.6)时, 中龄林总氮含量显著高于幼龄林( $P < 0.05$ ), 总磷含量在不同林龄之间差异不显著; 林龄相同(中龄林)时, 郁闭度为 0.6 的样地显著高于郁闭度为 0.4 样地中氮磷含量( $P < 0.05$ ); ③人工干扰强度(修枝和间伐两种不同抚育方式)对林地地表水氮磷含量也会有一定的影响但未达到显著水平( $P < 0.05$ )。综上所述, 云杉森林地表径流中氮磷含量主要来源于土壤, 有无植被覆盖对地表水氮磷含量影响显著, 森林郁闭度是地表水中氮磷含量关键影响因素。

**关键词:** 氮; 磷; 地表水; 云杉森林; 天山

**中图分类号:** S714.2

**文献标志码:** A

森林对地表水化学成分有重要作用。雨水冲刷植物表面, 叶被上的矿物质进入土壤, 在生态系统中循环<sup>[1]</sup>。降水溶解了土壤、岩石风化物及植物上的各种物质, 被枯落物、土壤等固定、分解、过滤和吸收, 最终导致不同林地类型的溪流中, 水化学成分及其含量随着林种、土壤、空间位置、地质条件等变化而存在显著差异<sup>[2-4]</sup>。

近年来, 国内外学者对森林地表水水质的分析主要从两个方面展开<sup>[5-7]</sup>: 一是探讨林冠层、树干茎、枯枝落叶层及土壤等各空间层次对水质的影响

及其作用机理<sup>[8-12]</sup>; 二是从系统的角度出发, 比较水分内的化学物质在森林生态系统输入和输出时的差异来阐明森林对水质的作用<sup>[13-17]</sup>。当前, 环境污染的加剧导致全球水质型缺水日益严重<sup>[1]</sup>, 在新疆等干旱区尤为突出。针对新疆地区的研究多集中于天山山区河流湖泊水质时空特征, 如乌鲁木齐河<sup>[18-19]</sup>、艾比湖流域<sup>[20]</sup>, 研究发现水体存在轻度的污染且其化学组成受到补给来源与发源的影响<sup>[18]</sup>。天山山地森林是天山南北的广大绿洲重要且唯一的水源涵养林地, 山区径流对河川径流和水资源影响

**收稿日期** (Received date): 2015 - 09 - 27; **改回日期** (Accepted date): 2017 - 09 - 26

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (U1503187); “十二五”农村领域国家科技计划课题 (2015BAD07B03 - 03); 新疆自治区科技支撑计划项目 (201331125) [National Natural Science Foundation of China (U1503187); National Science & Technology Pillar Program during the 12th Five-year Plan Period (2015BAD07B03 - 03); Science & Technology Pillar Program of Xinjiang Uighur Autonomous Region, China (201331125)]

**作者简介** (Biography): 谢锦 (1990 - ), 女, 河北衡水人, 博士研究生, 主要研究方向: 森林生态学 [Xie Jin (1990 - ), female, born in Hengshui of Hebei Province, Ph. D. candidate, mainly engaged in forest ecology.] E-mail: xjeduxj@126.com

\* **通讯作者** (Corresponding author): 常顺利, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 森林生态学 [Chang shunli, male, Ph. D., associate professor. research on forest ecology.] E-mail: ecocsl@163.com

巨大<sup>[21]</sup>,因受到气候变化、人类活动加剧导致环境污染的剧烈影响,森林地表水化学组成随之变化,但目前对天山云杉森林地表水水质及其影响因素的关注明显不足<sup>[22]</sup>。

本文依托国家林业局天山森林生态系统定位站开展实验,从林地类型、林龄、郁闭度、抚育方式等方面探讨天山云杉森林地表水氮磷含量的特征及其主要影响因素,为以水质优化为目的的天山云杉森林结构改造提供客观依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

坡面径流观测场布设依托于中国森林生态系统研究网络(CFERN, China Forest Ecology Research Net)天山森林生态系统定位研究站(E87°07′~87°28′,N43°14′~43°26′,驻地海拔1908 m)。该站位于天山北坡,属乌鲁木齐县板房沟林场。

本研究区属温带大陆性气候,年总辐射量达 $5.85 \times 10^5 \text{ J/cm}^2 \cdot \text{a}$ ,年均气温约为 $2 \sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,历年极端最高温为 $30.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,极端最低温为 $-30.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年降水量 $400 \sim 600 \text{ mm}$ ,雨季集中在 $6 \sim 8$ 月,最大积雪深度为 $65 \text{ cm}$ ,年蒸发量 $980 \sim 1150 \text{ mm}$ ,年均相对湿度 $65\%$ ,无霜期 $89 \text{ d}$ , $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温 $1170.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。该区植被类型是以天山云杉(*Picea Schrenkiana*)纯林为主的温带针叶林,森林覆盖率达 $60\%$ ,郁闭度介于 $0.4 \sim 0.8$ ,林下的草本层平均盖度小于 $3\%$ ,林间空地的草本盖度平均超过 $50\%$ <sup>[13-24]</sup>,林缘、林窗及林

下的灌木主要有栒子(*Cotoneaster melanocarpus* Lodd.)、小檗(*Berberis heteropoda* Schrenk 及 *Berberis nummularia* Bge.)、蔷薇(*Rosa spinosissima* L.)、绣线菊(*Spiraea hypericifolia* L.)、方枝柏(*Juniperus pseudosabina* Fisch. et Mey.)、锦鸡儿(*Caragana leucophloea* Pojark.)、忍冬(*Lonicera hispid*a Pall. ex Roem. et Schuet.)等,林下草本植物主要有老鹳草(*Geranium rotundifolium* L.)、羽衣草(*Alchemilla tianschanica* Juz.)、羊角芹(*Aegopodium podagraria* L.)等,林下土壤均为山地灰褐色森林土<sup>[24-25]</sup>。

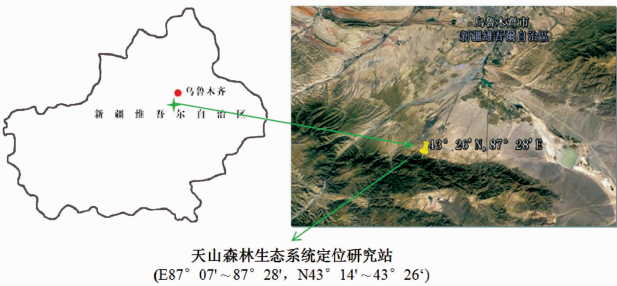


图1 研究区位置示意图  
Fig.1 The location of study area

1.2 样地与径流观测场布设方法

在乌鲁木齐县板房沟林场,布设了13个 $5 \times 20 \text{ m}$ 坡面径流观测场,坡面径流观测场的情况见表1。限于条件,各类型的坡面径流观测场重复数不足,因此,在实际分析过程中根据需要分别将这13个观测场归类为不同类型的重复,见下文数据分析方法所述。

表1 天山雪岭云杉森林径流观测场样地概况

Tab.1 General information of runoff observation plots of *Picea schrenkiana* forest in Tianshan

类型 Types	郁闭度 Canopy density	坡度/( $^\circ$ ) Slope gradient	枯落层厚度/(cm) Litter thickness	林分密度/(株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ ) Forest density	植被情况 Vegetation situation
成熟林	0.60	18	4.5	600	云杉纯林
近熟林	0.60	28	5.2	1215	云杉纯林
中龄林	0.80	18	2.8	1695	云杉纯林
中龄林	0.60	17	2.4	1110	云杉纯林
中龄林	0.40	35	1.7	525	云杉纯林
中龄林	0.20	32	0.9	420	云杉纯林
幼龄林	0.60	39	0.5	1455	云杉纯林下有少量草本覆盖
未抚育人工林	0.95	13	2.4	5745	云杉纯林
修枝抚育人工林	0.60	12.2	2.1	2100	云杉纯林
间伐抚育人工林	0.75	14.8	2.2	1800	云杉纯林
灌木林	0.80	15.5	0.6	2625	主要为小檗、蔷薇
灌木林	0.60	19.4	0.6	1845	主要为小檗、蔷薇
裸地	—	14	—	0	少量草本覆盖,主要为羽衣草

在观测场地表水汇水处放置漏斗,漏斗上口安置过滤网以防止泥石块和枯枝落叶混入水中,下口接软质塑料管,软管伸入到聚氯乙烯塑料桶内,桶上加盖封闭。

### 1.3 地表水样品的采集与测试方法

森林地表水采样于 2014 年 7~9 月份雨后进行,取径流观测场集水桶内上层清液,随后清空集水桶,保证下次水样为单次降水的地表径流。采样器为清洁的塑料瓶,每个水样一次采集 400 ml。同时,以清洁的玻璃或搪瓷容器接收采集大气降水。把降水形成径流,并且每个径流场集水桶内最小水量为 400 ml 时,定为有效降水,保证所有样地的地表水样为一个降水过程所产生的水样,依此标准共取样 5 次,随后进行 5 次测定。

所有水样于采后 24 h 内进行水质测试。样品测试指标为总氮和总磷,均采用百灵达公司水质分析产品进行测定。其中,分光光度计为英国百灵达 8000 型分光光度计。每个样品水质的测定重复 3 次,重复间差异过大时,增加重复次数,最后求取多个重复均值。

总氮测定采用百灵达试管检测总氮/30 测量法,测量量程为 0~30 mg/L。首先将水样用碱性过硫酸盐进行消解,将所有的含氮化合物转化为硝酸盐;然后将消解后的水样转移到百灵达试管检测硝酸盐氮/30 N 检测试管中,来测量水样中的总氮。反应之后水样颜色深度与总氮的浓度成比例,用百灵达光度计通过比色原理测得总氮的浓度。

总磷采用百灵达试管检测总磷/12 测量法,测量量程为 0~12 mg/L。首先将水样用酸性过硫酸盐进行消解,将所有的聚磷酸盐和有机磷转化为正磷酸盐;然后将消解后产生的正磷酸和水样中原有的正磷酸与钼酸氨和抗坏血酸反应,产生明亮的“钼蓝”色化合物,并通过比色法测得水样的总磷值。反应过程中加有催化剂,以促使显色反应能快速完成,并且加有抑制剂,以消除二氧化硅的干扰。反应之后水样颜色深度与总磷的浓度成比例,用百灵达光度计通过比色原理测得总磷浓度。

### 1.4 数据分析方法

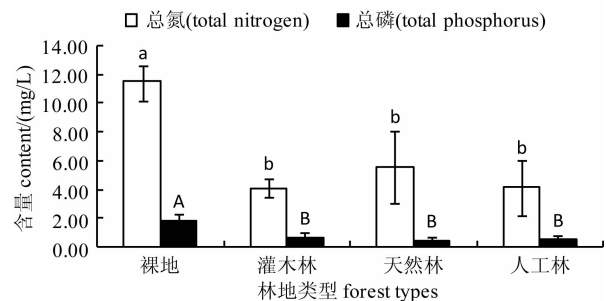
数据分析时,从林地类型(分为裸地、灌木林、天然林和人工林)、林龄(郁闭度均为 0.6,分为幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林)、郁闭度(林龄均为中龄林,为 0.2、0.4、0.6、0.8)、抚育方式(分为未抚育人工林、修枝抚育人工林和间伐抚育人工林)探讨影响天山云杉林森林地表水的因素。

本研究所得的数据均采用 SPSS17.0 统计软件和 Excel2007 进行分析绘图。应用方差分析(one-way ANOVA)和多重比较(LSD),分析不同林地类型、林龄、郁闭度和抚育方式对云杉森林地表水氮磷含量的影响;应用 Pearson 相关性分析讨论云杉森林地表水中氮磷含量与大气降水、植物叶片、枯落物层以及土壤中氮磷含量的相关性,显著性水平均设为 0.05。

## 2 结果分析

### 2.1 林地类型对地表水氮磷含量的影响

经采样测试分析,裸地、灌木林、天然林和人工林的地表水总氮含量排序为:裸地>天然林>人工林>灌木林;总磷含量排序为:裸地>灌木林>人工林>天然林,见图 2。经方差分析和多重比较可知,地表水中,裸地类型的总氮和总磷含量显著高于灌木林、天然林和人工林,但灌木林、天然林和人工林之间差异不显著( $P < 0.05$ )。



(注:图中小写字母 a、b 表示总氮含量差异显著性,大写字母 A、B 表示总磷含量差异显著性,以下图表标注方式相同。)

图 2 不同林地内地表水总氮和总磷含量

Fig. 2 The contents of total nitrogen and total phosphorus in surface water with different forest types

### 2.2 天然林中地表水氮磷含量随林龄的变化

经采样测试分析,天然林地表水中,总氮含量随林龄的变化规律为:幼龄林( $3.43 \pm 1.08$  mg/L) < 近熟林( $5.80 \pm 1.38$  mg/L) < 成熟林( $6.00 \pm 2.48$  mg/L) < 中龄林( $8.00 \pm 3.00$  mg/L),中龄林总氮含量显著高于幼龄林( $P < 0.05$ );总磷含量随林龄的变化规律为:幼龄林( $0.31 \pm 0.27$  mg/L) < 近熟林( $0.48 \pm 0.30$  mg/L) < 成熟林( $0.64 \pm 0.21$  mg/L) < 中龄林( $0.66 \pm 0.41$  mg/L),各林龄间的差异均不显著( $P < 0.05$ );见图 3。

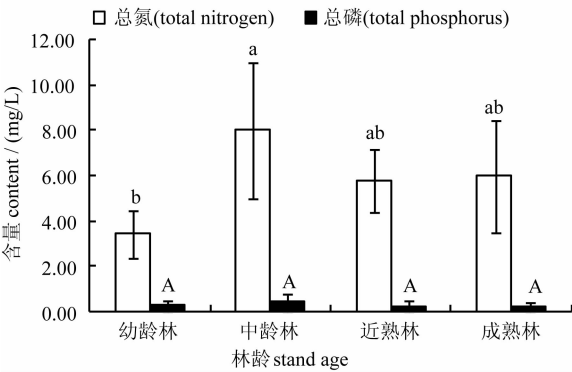


图3 不同林龄样地地表水中总氮和总磷含量  
Fig.3 The contents of total nitrogen and total phosphorus in surface water in plots with different stand ages

**2.3 天然中龄林地表水氮磷含量随郁闭度的变化**  
经采样测试分析,天然中龄林地表水中,总氮含量随郁闭度的变化表现为:0.6>0.2>0.8>0.4,其中郁闭度为0.6的地表水总氮含量(8.00±3.00 mg/L)显著高于郁闭度为0.4的地表水总氮含量(3.98±1.49 mg/L) ( $P<0.05$ );总磷含量的变化规律则为:0.6>0.8>0.2>0.4,其中郁闭度为0.6的地表水总磷含量(0.66±0.41 mg/L)同样显著高于郁闭度为0.4的地表水总磷含量(0.26±0.12 mg/L),其他郁闭度间比较,总磷含量差异不显著 ( $P<0.05$ );见图4。

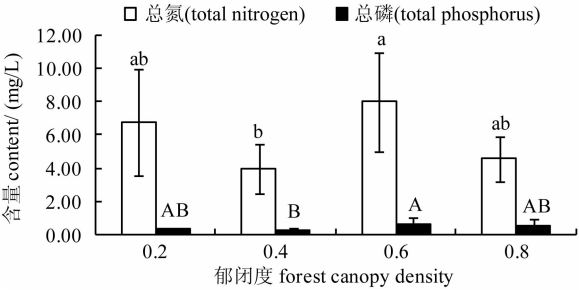


图4 不同郁闭度样地地表水中总氮和总磷含量  
Fig.4 The contents of total nitrogen and total phosphorus in surface water in plots with different canopy density

**2.4 抚育方式对人工林地表水氮磷含量的影响**  
经采样测试分析,在人工林(包括各不同抚育

方式人工林和未抚育人工林)地表水中,总氮平均含量为 $4.16 \pm 1.90$  mg/L,总磷平均含量为 $0.51 \pm 0.30$  mg/L。  
在不同抚育方式的人工林地表水中,氮含量表现为未抚育>间伐抚育>修枝抚育;磷含量表现为修枝抚育>未抚育>间伐抚育;不同抚育方式对总氮和总磷含量影响均不显著( $P<0.05$ ),见图5。

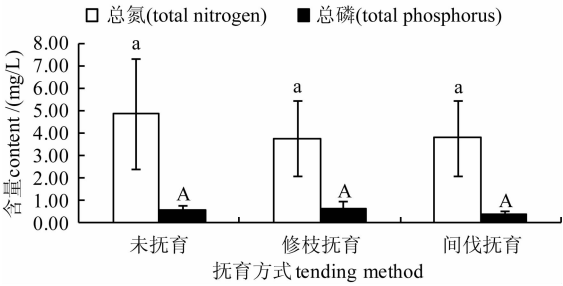


图5 不同抚育方式样地地表水中总氮和总磷含量  
Fig.5 The contents of total nitrogen and total phosphorus in surface water in plots with different tending method

3 结论与讨论

**3.1 背景因素对森林地表水氮磷含量的影响**  
为了探究大气降水、叶片氮磷含量等背景因素对天山云杉森林地表水氮磷含量的影响,本文对这些背景因素也做了测试分析,结果见表2。  
大气降水中总氮和总磷含量很小;云杉叶片与灌木叶片中总氮和总磷含量相差较小;土壤中总氮和总磷含量分别为 $2.17 \pm 0.61$  g/kg和 $1.01 \pm 0.28$  g/kg。  
大气降水、叶片氮磷含量等背景因素与地表水中氮磷含量的关系见表3。地表水中总氮的含量与大气降水、植物叶片、枯落物以及土壤中的总氮含量呈正相关关系,其中与土壤总氮含量相关性显著( $P<0.05$ ),相关系数最大为0.72,其次是地表水中总氮与大气降水中总氮含量的相关系数0.68,枯落物中总氮含量与地表水中总氮含量相关性最小,相关系数为0.41。地表水中总磷含量与背景因素的相关关系表现为相同的规律。这说明,地表水中总

表2 大气降水、植物叶片、枯落物和土壤中氮磷含量  
Tab.2 Nitrogen and phosphorus contents in rain water, plant leaves, litter and soil

元素 Elements	大气降水/(mg/L) Rain water	云杉叶片/(g/kg) <i>Picea schrenkiana</i> leaves	灌木叶片/(g/kg) Shrub leaves	枯落物/(g/kg) Litter	土壤/(g/kg) Soil
N	1.56 ± 0.23	19.38 ± 4.08	19.55 ± 6.38	4.25 ± 0.03	2.17 ± 0.61
P	0.12 ± 0.02	0.98 ± 0.22	1.15 ± 0.54	0.65 ± 0.12	1.01 ± 0.28

表 3 地表水中 N、P 含量与大气降水、植物叶片、枯落物和土壤中 N、P 含量相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient between N, P contents in surface water and the contents in rain water, plant leaves, litter and soil

	元素	大气降水	云杉叶片	灌木叶片	枯落物	土壤
	Elements	Rain water	<i>Picea schrenkiana</i> leaves	Shrub leaves	Litter	Soil
地表水	N	0.68	0.51	0.63	0.41	0.72 *
Surface water	P	0.50	0.23	0.45	0.46	0.68 *

\*. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

氮和总磷含量主要受土壤中氮磷含量的影响,而植物叶片和枯落物中氮磷含量对地表水中氮磷含量影响较小。

### 3.2 林地类型因素对森林地表水氮磷含量的影响

森林地表水主要受大气沉降、冠层淋洗、林内下垫面植被、枯落物层以及土壤等因素的影响,这些因素对随水分携带穿过其间的各种物质进行过滤吸附和淋溶。在本研究工作中,由于裸地、灌木林、人工林、天然林的植被盖度逐渐增大,枯落物层逐渐增厚,持水能力增强,因此,理论上它们对氮磷的淋溶和阻截作用也应逐渐增强,即:裸地 < 灌木林 < 人工林 < 天然林。实际在天山北坡中段云杉森林发现,地表水中的总氮、总磷含量表现为:裸地显著高于其他三种林地类型,而灌木林、天然林和人工林之间差异不显著。辛颖对西泉眼水库区水源涵养林地表径流研究发现<sup>[26]</sup>:落叶松人工林(总磷 2.518 mg/L 和总氮 7.924 mg/L) > 红松人工林(1.521 mg/L 和 6.302 mg/L) > 榛子灌丛(1.024 mg/L 和 2.919 mg/L) > 云杉幼林地(0.369 mg/L 和 1.020 mg/L)。陶豫萍通过对四川乐山沙湾地区森林对污染物( $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $PO_4^{3-}$ 、 $SO_4^{2-}$ )的过滤作用研究,发现裸地所有污染物的浓度均是输出大于输入,净化效果较差;而香樟林(阔叶林)输出的离子浓度小于马尾松林(针叶林)的浓度,因而香樟林的净化效果要好于马尾松林<sup>[27]</sup>。与本研究结果基本一致。原因可能是降水过程中,裸地缺少林冠层的遮挡,雨水直接冲刷地面使得土壤中氮磷被雨水带走,因此裸地地表径流中总氮和总磷含量明显高于其他林地类型,说明植被的覆盖(尤其是自然生长植被)对地表水中氮磷含量影响显著。

### 3.3 生长发育因素对森林地表水氮磷含量的影响

一方面,天然森林林地的生长(反映在同郁闭度的不同林龄上)可能通过枯落物层对地表水中 N、P 含量产生影响。

由于历史因素,在天山北坡中段,云杉人工林通常树龄小于 40 a,即处于幼龄林阶段;而大部分天然云杉森林则处于中龄林阶段,几无过熟林林地。在

本研究中,天然林地表水总氮随林龄的变化规律表现为:幼龄林 < 近熟林 < 成熟林 < 中龄林,中龄林显著高于幼龄林;总磷则为:幼龄林 < 近熟林 < 成熟林 < 中龄林,但不同林龄样地总磷含量变化差异均不显著。前人研究表明:该地区不同林龄样地地表径流中氨氮浓度顺序为:幼龄林 < 中龄林 < 成熟林 < 近熟林,总磷浓度顺序为:幼龄林 < 成熟林 < 近熟林 < 中龄林<sup>[22]</sup>,与研究结果基本一致。其原因可能是中龄林为植物生长旺盛阶段,微生物的分解能力较强,枯落物层的氮磷被大量分解,并随雨水进入径流;而成熟林地地表枯落物层较厚(见表 1),径流过程中所受阻力大且水分渗透系数较大,降水对枯落物层的淋洗过程中,部分的氮磷滞留在土壤层中,因此,中龄林地表水中氮磷含量大于其他林龄。

另一方面,林冠层是水质影响效应的重要层次之一<sup>[22]</sup>,天然森林林地的密度(反映在同林龄的不同郁闭度上)也可能通过林木冠层对地表水 N、P 的含量产生影响。

在本研究的天然中龄林系列样地的地表水中,总氮含量随郁闭度的变化表现为:0.6 > 0.2 > 0.8 > 0.4,郁闭度为 0.6 时的总氮含量显著高于郁闭度为 0.4 的总氮含量;总磷含量的变化规律则为:0.6 > 0.8 > 0.2 > 0.4,同样,郁闭度为 0.6 时的总磷含量显著高于郁闭度为 0.4 的总磷含量。李海军对天山中部云杉森林冠层水质影响效应进行研究发现森林郁闭度越大,林冠层对水质影响越明显,地表水中氨氮和总磷含量随森林郁闭度的增加而增加<sup>[22]</sup>。该结果与本研究基本一致。可能是由于正值夏季,林木新陈代谢旺盛,汁液分泌物较多,相对多的氮被淋溶;且随郁闭度增大,地表枯落物厚度增大,枯落物中的氮、磷被冲刷,使得地表水中氮、磷含量增加,同时随着郁闭度的增大,林冠对雨水的阻截能力增大,减小了对地表的冲刷,使得土壤中氮磷元素进入地表水减少,三者共同作用,最终使得郁闭度为 0.6 时,地表水中氮磷含量最高,郁闭度为 0.4 时,地表水中氮磷含量最低。这说明在森林发育因素中,郁闭度对地表水中氮磷含量影响更大。

### 3.4 人工干扰强度因素对森林地表水氮磷含量的影响

在天山北坡中段云杉人工林中,根据实际需要可能会进行修枝、间伐等抚育,合理的抚育能增强林地的涵养水源功能<sup>[28-32]</sup>。抚育方式在本质上是人工干扰的强度有所区别,修枝抚育对林地的人工干扰强度小于间伐抚育。抚育间伐主要通过影响森林土壤层进而对森林水质产生影响<sup>[33]</sup>。李力<sup>[34]</sup>认为林冠层面积变小或受损,缺失林冠层的保护,降水对表土的溅蚀加剧,使得径流中营养元素浓度增大。石丽丽对不同抚育强度的华北落叶松人工林土壤蓄水量进行研究<sup>[31]</sup>,认为土壤蓄水功能随着间伐保留密度的减小逐渐增大。在本研究的人工林系列样地中,氮含量表现为未抚育>间伐抚育>修枝抚育,磷含量表现为修枝抚育>未抚育>间伐抚育,不同抚育方式样地的地表水氮磷含量均存在不显著的差异。原因可能是未抚育、修枝抚育和间伐抚育三者相比,人工干扰强度逐渐增大,林分密度减小,但其郁闭度仍较为接近,使得对枯落物的淋溶、地表的冲刷强度相近,最终使得地表水中氮磷含量不存在显著差异。

### 3.5 结论

不同林地类型比较,裸地地表水氮磷含量显著高于人工林、灌木林、天然林三种样地( $P < 0.05$ );在天然林系列样地中,郁闭度相同时,中龄林总氮含量显著高于幼龄林( $P < 0.05$ ),总磷含量在不同林龄之间差异不显著;林龄相同时,郁闭度为0.6的样地显著高于郁闭度为0.4样地中氮磷含量( $P < 0.05$ );人工林样地内,修枝和间伐两种不同抚育方式对林地地表水氮磷含量影响不显著( $P < 0.05$ )。

综上分析,林地类型对天山云杉森林地表水氮磷含量有重要的影响,有无植被覆盖是首要影响因素;群落生长发育对森林地表水氮磷含量影响显著,其中森林郁闭度是关键影响因素。此外,人工干扰强度(如抚育)虽对林地地表水氮磷含量有一定影响,但非主要影响因素。

### 参考文献(References)

[1] 张胜利,李光录. 秦岭火地塘森林生态系统不同层次的水质效应[J]. 生态学报, 2007, **27**(5):1838-1844. [ZHANG Shengli, LI Guanglu. The effects of different components of the forest ecosystem on water quality in the Huoditang forest region, Qinling Mountain Range [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(5): 1838-1844.]

[2] 施立新,余新晓,马钦彦. 国内外森林与水质研究综述[J]. 生态学杂志, 2000, **19**(3):52-56. [SHI Lixin, YU Xinxiao, MA Qinyan. Review on the study of forest and water quality [J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, **19**(3):52-56.]

[3] 王庆成,姚琴,牟溥,等. 凉水帽儿山地区低阶溪流生境和水质状况[J]. 生态学报, 2007, **27**(12):5176-5183. [WANG Qingcheng, YAO Qin, MU Pu, et al. Habitat assessment and water quality analysis of low order streams in different landscapes in Liangshui and Maershan, Heilongjiang, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(12):5176-5183.]

[4] 石福臣,李凤英,蔡体久,等. 不同森林林地类型溪流化学特征的季节动态[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(4):717-722. [SHI Fucheng, LI Fengying, CAI Jiuti, et al. Seasonal dynamics of hydrochemical characteristics of streams under different forests types [J]. Journal of Applied Ecology, 2008, **19**(4):717-722.]

[5] VOROBEICHIK E. L., PISHCHULIN P. G.. Effect of individual trees on the pH and the content of heavy metals in forest litters upon industrial contamination [J]. Eurasian Soil Science, 2009, **8**: 927-939.

[6] CHIWA M., CROSSLEY A., SHEPPERD L. J., et al. Through fall chemistry and canopy interaction in a Sitka spruce plantation sprayed with six different simulated polluted mist treatments [J]. Environmental Pollution, 2004, **127**:57-64.

[7] 郎燕. 小兴安岭不同类型原始红松林对降雨水化学特征的影响[D]. 哈尔滨:东北林大, 2012:1-35. [LANG Yan. Effects of different types of original Pinus Korainensis Forest on rainfall [D]. Northeast Forestry University. 2012:1-35.]

[8] 蒋益民,曾光明,张龚,等. 森林降水化学的变化特征和机理[J]. 环境污染与防治, 2003, **25**(5):271-276. [JIANG Yi-min, ZENG Guangming, ZHANG Gong, et al. Variation of chemical properties and the mechanisms of the forested precipitation [J]. Environmental Pollution and Control, 2003, **25**(5): 271-276.]

[9] 李凌浩,林鹏,何建源,等. 森林降水化学研究综述[J]. 水土保持学报, 1994, **8**(1):84-95. [LI Linghao, LIN Peng, HE Jianyuan, et al. Review on the study of forest precipitation chemistry [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1994, **8**(1):84-95.]

[10] 欧阳学军,周国逸,黄忠良,等. 鼎湖山森林地表水水质状况分析[J]. 生态学报, 2002, **22**(9):1373-1379. [OUYANG Xuejun, ZHOU Guoyi, HUANG Zhongliang, et al. Analysis on runoff water quality in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, **22**(9): 1373-1379.]

[11] 伍倩,闫文德,田大伦,等. 杉木人工林不同层次植被穿透水的水化学特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, **1**(31):59-62. [WU Qian, YAN Wen-de, TIAN Dalun, et al. Hydrochemical characteristics of through-fall in different layers of Cunninghamia lanceolata plantations [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, **1**(31):59-62.]

[12] 李海涛,韩兴国,陈灵芝. 华北暖温带山地落叶阔叶混交林的茎流研究[J]. 生态学报, 1997, **17**(4):371-376. [LI Haitao, HAN Xingguo, CHEN Lingzhi. A study on the stemflow of the deciduous broad-leaved mixed forest in the warm temperate zone of northern china [J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, **17**(4):371-

376. ]
- [13] 彭培好,王金锡,胡振宇,等. 人工桧柏混交林中降雨对养分物质的淋溶影响[J]. 生态学报,1996,15(5):12-15. [PENG Peihao, WANG Jinxi, HU Zhenyu, et al. The effects of the pardoning of rainfall on the nutrients leaching processes in the mixed alums cremastogyne and cupressus funebrils forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 1996, 15(5):12-15. ]
- [14] 周国逸,闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响[J]. 生态学报,2001,21(12):2002-2012. [ZHOU Guoyi, YAN Junhua. The influences of regional atmospheric precipitation characteristics and its element inputs on the existence and development of Dinghushan forest ecosystems [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(12):2002-2012. ]
- [15] 满秀玲,范金凤,谭晓京,等. 森林和沼泽对溪流水化学特征的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(6):992-996. [MAN Xiuling, FAN Jinfeng, TAN Xiaojing, et al. Effects of forest and swamp on hydrochemical characteristics of streams [J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 17(6):992-996. ]
- [16] 张胜利. 秦岭火地塘森林水质的季节性变化特征[J]. 环境科学,2008,29(2):316-321. [ZHANG Shengli. Seasonal water quality changes in the Huoditang forest region of the Qinling Mountain Range [J]. Environent Science, 2008, 29(2):316-321. ]
- [17] 刘焯章,田大伦,周志华. 杉木林生态系统净化水质功能的研究[J]. 林业科学,1995,31(3):193-199. [LIU Xuanzhang, TIAN Dalun, ZHOU Zhihua. Studies on the function for purifying water of Chinese Fir plantation ecosystem [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1995, 31(3):193-199. ]
- [18] 吴丽娜,孙从建,贺强,等. 中天山典型内陆河流域水化学时空特征分析[J]. 水土保持研究,2017,24(5):149-156. [WU Lina, SUN Congjian, HE Qiang, et al. Analysis of temporal spatial variation of hydrochemical characteristics of the typical inland river in the middle of Tianshan Mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(5):149-156. ]
- [19] 王甜,蔡林钢,牛建功,等. 乌鲁木齐和地表水化学组成及时空分布特征[J]. 干旱环境监测,2017,31(3):102-109. [WANG Tian, CAI Lingang, Niu Jiangong, et al. Composition and temporal-spatial distribution of surface water in Urumqi River [J]. Arid Environment Monitoring, 2017, 31(3):102-109. ]
- [20] 任岩,张飞,王娟,等. 新疆艾比湖流域地表水丰水期和枯水期水质分异特征及污染源解析[J]. 湖泊科学,2017,29(5):1143-1157. [REN Yan, ZHANG Fei, WANG Juan, et al. Spatio-temporal characteristics and source identification of surface water pollutants in Lake Ebinur Watershed, Xinjiang [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(5):1143-1157. ]
- [21] 李卫红,陈亚宁,郝兴明,等. 新疆天山北坡河川径流对气候变化的响应研究——以头屯河为例[J]. 中国科学, D 辑:地球科学,2006,36(增刊 II):39-44. [LI Weihong, CHEN Ya-ning, HAO Xingming, et al. The runoff of Xinjiang Tianshan Mountains response to climate change in a case of Toutun River [J]. SCIENCE IN CHINA Ser. D Earth Sciences, 2006, 36(S II):39-44. ]
- [22] 李海军,张毓涛,张新平,等. 天山中部天然云杉林森林生态系统降水过程中的水质变化[J]. 生态学报,2010,30(18):4828-4838. [LI Haijun, ZHANG Yutao, ZHANG Xinping, et al. The water quality changes during rainfall in natural *Picea schrenkiana* var. *tianshanica* forest ecosystem in the Middle Tianshan mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18):4828-4838. ]
- [23] 张毓涛,梁凤超,常顺利,等. 基于8hm<sup>2</sup>样地的天山云杉林蒸腾耗水从单株到林分的转换[J]. 生态学报,2011,31(12):3330-3339. [ZHANG Yutao, LIANG Fengchao, CHANG Shunli, et al. Scaling up for transpiration of *Pinaceae schrenkiana* stands based on 8 hm<sup>2</sup> permanent plots in Tianshan Mountains [J]. Acta ecologica sinica, 2011, 31(12):3330-3339. ]
- [24] 阿米娜木·艾力,常顺利,张毓涛,等. 天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素[J]. 生态学报,2014,34(7):1626-1634. [Aminem ELI, CHANG Shunli; ZHANG Yutao, et al. Altitudinal distribution rule of *Picea schrenkiana* forest's soil organic carbon and its influencing factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(7):1626-1634. ]
- [25] 仇瑶,常顺利,张毓涛,等. 天山林区六种灌木生物量的建模及其器官分配的适应性[J]. 生态学报,2015,35(23):7842-7851. [QIU Yao, CHANG Shunli, ZHANG Yutao, et al. Biomass estimation modeling and adaptability analysis of organ allocation in six common shrub species in Tianshan Mountains forests [J]. China Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23):7842-7851. ]
- [26] 辛颖. 西泉眼水库库区水源涵养林对水质的影响[D]. 哈尔滨市:东北林业大学. 2005:3-40. [XIN Ying. Influence of water conservation forest in region of Xiquanyan reservoir on water quality [D]. Northeast Forestry University. 2005:3-40. ]
- [27] 陶豫萍. 森林过滤器对污染物的过滤作用及其水化学特征[D]. 成都:中国科学院成都生物研究所. 2005:2-45 [TAO Yuping. The functions of forests in filtering wet deposition of pollutants and their hydro-chemical characteristics [D]. Chengdu: Chengdu Institute of Biology, the Chinese Academy of Sciences. 2005:2-45. ]
- [28] 黎江. 松华坝水源区典型林型水源涵养功能及其对水质的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2010:1-39. [LI Jiang. Water conservation function of typical forest types and their impacts on water quality in Song Hua Ba water source area [D]. Northeast Forestry University. 2010:1-39. ]
- [29] 罗伟慧,曼秀玲,田野宏,等. 大兴安岭寒温带地区森林流域溪流水化学特征[J]. 水土保持学报,2013,27(5):119-124. [LUO Weiman, MAN Xiuling, TIAN Yehong, et al. Hydrochemical characteristics of Streams of forest watershed in cold-temperate zone of Greater Xing'an Mountains, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5):119-124. ]
- [30] 梁元瑞. 修枝对杉木幼林土壤肥力的影响初报[J]. 福建林业科技,2007,34(4):63-70. [LIANG Yuanrui. Effects of pruning on soil fertility of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2007, 34(4):63-70. ]
- [31] 石丽丽,徐成立,王雄宾,等. 抚育间伐对华北落叶松人工林涵



- 养水源功能影响[J]. 南水北调与水利科技, 2013, **11**(2): 15 – 19. [SHI Lili, XU Chengli, WANG Xionghin, et al. Effects of thinning on water conservation of *Larix Principis-rupprechtii* plantation in mountainous area of north Hebei[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, **11**(2): 15 – 19.]
- [32] 方晰, 田大伦, 项文化. 间伐对杉木人工林生态系统碳贮量及其空间分配格局的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, **30**(11): 47 – 53. [FANG Xi, TIAN Dalun, XIANG Wenhua. Effects of thinning on carbon storage and its spatial distributions in Chinese Fir plantation ecosystem [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, **30**(11): 47 – 53.]
- [33] 刘永杰. 秦岭火地塘林区两种森林生态系统水质效应及抚育间伐对水质的影响[D]. 西北农林科技大学, 2014: 1 – 19. [LIU Yongjie. 2014. Water effects of two forest ecosystems and effects of thinning on forest water quality at Huoditang region in Qinling Mountains[D]. Northwest A&F University. 2014: 1 – 19.]
- [34] 李力. 南岭受损常绿阔叶林对降水水质影响机理[D]. 中南林业科技大学, 2014: 1 – 26. [LI Li. Effects of canopy damage on hydrochemistry of rainfall in evergreen broadleaved forest of Nanling Mountains [D]. Central South University of Forestry and Technology. 2014: 1 – 26.]

## Nitrogen and Phosphorus Contents in Surface Water of *Picea schrenkiana* Forest in the Middle Zone of the Northern Slope of Tianshan Mountains

XIE Jin<sup>1,3,4</sup>, CHANG Shunli<sup>1</sup>, ZHANG Yutao<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>2</sup>, LI Jimei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology, College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China;

3. CAS Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Shenyang 110016, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Forest structure has a strong influence on the chemical composition of surface water, and it is scientifically necessary to quantify the relationship between forest structure and change in water quality. To explore the nitrogen and phosphorus contents and the main factors affecting them in the surface water of a *Picea schrenkiana* forest, 13 runoff observation plots were selected in Banfanggou forest farm on the northern slope of the Tianshan Mountains in terms of forest type, stand age, canopy density, and tending method. The runoff surface water collected after rainfall was used to determine total nitrogen and phosphorus contents. Results showed that: (1) forest types had an important influence on the nitrogen and phosphorus contents in the surface water; the runoff from plantation, shrub forest, and natural forest had significantly lower nitrogen and phosphorus contents than those from bare lands ( $P < 0.05$ ). (2) The community development stage also had an important influence on the nitrogen and phosphorus contents in the surface water. In natural forests with the same canopy density (0.6), middle-age forest had higher nitrogen content than young forest did, whereas no significant differences were observed among different stand ages for phosphorus. When stand age was the same (middle-aged plots), nitrogen and phosphorus contents were significantly higher in plots with a canopy density of 0.6 than 0.4 ( $P < 0.05$ ). (3) Management intensity (pruning and thinning) in plantation affected the nitrogen and phosphorus contents, but not significantly ( $P < 0.05$ ). In conclusion, the nitrogen and phosphorus contents in surface water mainly derived from soil and were significantly influenced by vegetation coverage and forest canopy density.

**Key words:** nitrogen; phosphorus; surface water; spruce forest; the Tianshan Mountains