

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

李海军^{1,2}, 张毓涛^{1,*}, 张新平¹, 韩占涛³, 芦建江¹, 李翔¹

(1. 新疆林业科学院森林生态研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆农业大学草环学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
3. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061)

摘要:通过对天山中部天山云杉(*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*(Rupr.) Chen et Fu)不同郁闭度、林龄天然林区内,降水在转化过程中各环节(包括大气降水、穿透水、地表径流、地下渗水)的水质变化规律,以及森林生态系统不同层次对水质的影响对比分析。结果表明:(1)天山云杉林生态系统对降雨的水质影响,随郁闭度和林龄的增加而增强。在林龄相同的条件下,表现为:0.2<0.4<0.6<0.8;在郁闭度为0.8的条件下,表现为:幼龄林<中龄林<成熟林<近熟林;(2)大气降水透过林冠层后,水中的养分含量显著增高,表现为溶解氧含量减小,氨氮、COD、BOD、总磷、钾含量增加;(3)穿透水转化为地表径流,水中的溶解氧浓度进一步降低,COD、BOD、总磷、钾的含量升高,氨氮浓度降低;(4)总地下渗水的各项水质指标均明显优于大气降水,土壤层是森林生态系统净化水质的关键层。(5)通过对各集水区域水质指标量化综合评价,天山云杉林生态系统内的水质质量表现为:7月份>9月份>8月份;(6)利用主成分分析方法(PAC)构建的水质综合评价多元线性模型,具有很强代表性,能很好地用于水质的等级评价。

关键词:森林生态系统;不同林龄;不同郁闭度;水质;主成分分析;天山云杉

The water quality changes during rainfall in natural *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* forest ecosystem in the Middle Tianshan mountains

LI Haijun^{1,2}, ZHANG Yutao^{1,*}, ZHANG Xinping¹, HAN Zhantao³, LU Jianjiang¹, LI Xiang¹

1 Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830000, China

2 College of Pratacultural and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

3 Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geosciences, Shijiazhuang 050061, China

Abstract: Forest is titled as “green reservoir” which has incredible ecological functions, such as: reserving water, depurating water quality, etc. Therefore, understanding the effects of different components of the forest ecosystem on water quality is significant. In this study, the *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural forest was taken as the object in the middle Tianshan mountains at Tianshan Forest Ecosystem Research Station. There are totally eight sample plots according to the forest canopy density (0.2, 0.4, 0.6, and 0.8) and forest age (young forest (0—60a), middle\aged forest (60—100a), nearly mature forest (100—120a), and mature forest (120—160a)) in this area. In the plant growing season (July, August, September), all of water samples in the condition of rainfall over 30mm were collected using high-density polyethylene plastic bottle and detected in Xinjiang Environmental Monitoring Station. The water quality changes during rainfall transformation process were investigated on rain fall, through fall, surface runoff and underground seepage water. The water samples were analyzed chemically to determine the effects of different ecosystem components on water quality. The results showed that: (1) The influence of forest ecosystem on water quality of rainfall was enhanced as the canopy density and forest age increased. When forests were in same age, the sequence of this influence on water quality was canopy

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划(2006BAD03A1804, 2006BAD03A0702/wb08);新疆林业科技专项资金项目;国家林业公益性行业科研专项(200804022c)

收稿日期:2010-02-08; **修订日期:**2010-06-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyt218@163.com

density of $0.2 < 0.4 < 0.6 < 0.8$. When canopy density was 0.8, the sequence of forest influence on water quality was young forest < middle-aged forest < mature forest < near mature forest; (2) When the rainfall entered forest canopy, the nutrient content in water was significantly increased as dissolved oxygen decreased and ammonia nitrogen, COD, BOD, total phosphorus as well as potassium content increased; (3) When the through fall turned into surface runoff, the concentration of dissolved oxygen in water further declined, along with COD, BOD, total phosphorus and potassium content increased. Meanwhile, the ammonia nitrogen concentration remarkably decreased; (4) The soil layer had strong decontaminating ability and high nutrient accumulation function in natural forest ecosystem. The water quality indicator of total underground seepage was much better than those of precipitation, indicating that forest soil layer is the most critical layer of the forest ecosystem. (5) The sequence of the water quality in the forest ecosystem scored by quantitative and comprehensive assessment on was July > September > August; (6) The multi-factor line model established by principal component analysis (PAC) method was representative and can be better used for comprehensive assessment on water quality.

Key Words: forest ecosystem; different forest-age; different forest canopy density; water quality; principal component analysis; *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*

森林生态系统是地球上最活跃的系统之一,其作为净化水质、清洁水源的生态载体,素有“绿色水库”之称。而水分循环是连接大气、土壤、植物于一起的主要环境因子^[1]。降水通过森林植被系统,其各项水质指标发生变化,进而森林系统养分也随之发生改变。因此,降水便成了森林生态系统化学物质的主要来源之一,也是森林生态系统养分循环及养分平衡的基础^[2]。

国内外学者对森林水质做了大量的研究。主要集中在两个方面,即森林生态系统的水质效应评价^[3-5]和森林系统部分层次对水质的影响^[6-8]研究。对于更为细致的森林水质效应的研究并不多见,比如:郁闭度、林龄对降水水质的影响特征。

该研究以天山森林生态系统定位研究站为依托,依据降水与森林生态系统的相互作用原理,系统分析了不同郁闭度和林龄林地内林冠截流和地表径流的水质特征,客观比较了森林生态系统内各个环节的水质效应,旨在说明降水在森林生态系统内循环过程中化学组分的变化规律,科学评价水分转化过程中森林生态系统对水质的调节和影响能力,为人工水源涵养林的建设以及森林系统的健康评价提供科学的依据。

1 研究区概况

天山山系横贯新疆中部,位于准噶尔盆地和塔里木盆地之间,呈东西走向,是亚洲最大山系之一。天山云杉主要分布于天山,是新疆山地森林中分布最广、蓄积量最大的主要树种,对天山的水源涵养、水土保持和林区生态系统的形成与维护起着主导作用^[9]。天山北坡作为新疆最重要的水源涵养林区,是新疆天山最重要的水源涵养地。

天山森林生态系统定位研究站隶属于国家林业局,是国家林业局森林生态系统定位研究网络(CFERN)之一。研究区位于天山山脉中段北坡,海拔 1908—2960m,属温带大陆性气候区,年平均气温 $-2.1 \sim -4.5^{\circ}\text{C}$;年降水量 400—600mm,雨季集中在 6—8 月份;年蒸发量 980—1150mm;年均相对湿度 64%—66%,干燥度 1.2—1.6。林下土壤为山地灰褐色森林土,表层有明显而较厚的枯落物层,腐殖质层较厚。研究区域总面积为 369hm²,森林植被均为天然林,覆盖率约为 60%,其中中龄云杉林占 56%;幼龄云杉林占 13.2%;近熟、成熟云杉林占 30.4%。主要的灌木树种忍冬、蔷薇、天山花楸、小檗等仅占林区的 0.4%。

研究区地被植物主要有:羊茅(*Festuca ovina*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、老鹳草(*Geranium dahuricum* DC.)、天山羽衣草(*Alchemilla tianschanica* Juz.)、天蓝岩苣(*Cicerbita azurea* (Ledeb.) Beauv.)、羊角芹(*Aegopodium podagraria* L.)等。

2 研究内容和实验方法

2.1 研究内容

森林生态系统中水分受森林的影响所表现出来的水分分配和运动过程,包括林冠截留、树干茎流、地表径

流、地下渗流等几个阶段。研究区域内云杉林下无杂木,除幼龄林含有少量的草本覆盖外,其余几乎均无草本覆盖,因此,灌木和草本植被对降水的影响可以忽略不计;另外,林内树干茎流集水量很小,其对水质的影响微乎其微,暂不考虑。由于山地森林土壤厚度不均,土壤结构差异性较大,土壤渗流过程中往往会出现交叉混流现象,增大了样地的地下渗水水质的误差系数,单独样地的地下渗水水质并不能代表样地真实的水质特征;相对而言,总的地下渗水比样地型地下渗水更能客观地、有效地反映森林生态系统的整体净化功能。因此,本研究选择大气降水、林内穿透水、地表径流、总地下渗水的水质特征作为本次研究的主要内容。

2.2 样地布设与水样采集

(1)在研究区内,选取代表性的地段,依据森林郁闭度(0.2、0.4、0.6、0.8)和林龄(幼龄林(0—60a)、中龄林(>60—100a)、近熟林(>100—120a)、成熟林(>120—160a))分别布置坡面径流样地和林内穿透雨截留设施。各集水区域的基本概况参见表1。

在径流样地和穿透雨的汇水处放置过水塑料漏斗,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。聚氯乙烯塑料集水桶低于汇水点高度,以便雨水能够全部顺畅地流入到集水桶内。

(2)由于所有监测样地均设在同一山体半山腰处,林分特征、下垫面植被、周边地形以及气象条件基本相同,降水水质随海拔高度影响的变异系数极小。因此,将大气降水的采样点设在生态站的400m²空地平台上,周围无任何物体的遮掩和阴影,采用直径为20cm的不锈钢雨量筒作为接收容器。共设4个样点,降雨完毕后,混匀采集。

(3)总地下渗水采样点选择在生态站的区域性水量平衡场的地下水出口处,土壤层深度为50cm,降雨48h后,直接使用采样瓶采集。

(4)水样采集容器均采用高密度聚乙烯塑料瓶。选择降雨量在30mm以上的时段进行试验,采样时间分别为2009年的7月3日、8月6日、9月14日共3次,降雨量分别为36、41、48mm。雨后及时采集各集水点的水样。

表1 不同集水区域的基本概况

Table 1 General situation of different catchment plots

代码 Code	集水类型 Types of catchment	林龄类型 Forest age	郁闭度 Canopy density	海拔/m Altitude	坡向 Slope direction	坡度 Gradient	枯落层厚 度/cm Litter thickness	面积 /m ² Area	植被情况 Vegetation situation
0	大气降水	—	—	1909	—	—	—	—	—
3	总地下渗水	—	—	1937	—	—	—	—	—
1-2	穿透雨	中龄林	0.2	1940	—	—	—	16	天山云杉纯林无下杂木
1-4	穿透雨	中龄林	0.4	1940	—	—	—	16	天山云杉纯林无下杂木
1-6	穿透雨	中龄林	0.6	1935	—	—	—	16	天山云杉纯林无下杂木
1-8	穿透雨	中龄林	0.8	1920	—	—	—	16	天山云杉纯林无下杂木
2-2	径流水	中龄林	0.2	2505	NE10°	32	0.85	100	天山云杉纯林无下杂木
2-4	径流水	中龄林	0.4	2505	NW35°	35	1.70	100	天山云杉纯林无下杂木
2-6	径流水	中龄林	0.6	1925	NE13°	17	2.40	100	天山云杉纯林无下杂木
2-8	径流水	中龄林	0.8	1919	N	18	2.80	250	天山云杉纯林无下杂木
4-1	穿透雨	幼龄林	0.8	1945	—	—	—	1.2	天山云杉纯林有草本覆盖
4-2	径流水	幼龄林	0.8	1945	ES5°	39	0.45	75	天山云杉纯林有草本覆盖
5-1	穿透雨	近熟林	0.8	1948	—	—	—	16	天山云杉纯林无下杂木
5-2	径流水	近熟林	0.8	1948	NW10°	28	5.15	220	天山云杉纯林无下杂木
6-1	穿透雨	成熟林	0.8	1950	—	—	—	16	天山云杉纯林无下杂木
6-2	径流水	成熟林	0.8	1950	N	18	4.48	108	天山云杉纯林无下杂木

2.3 水样测定

所测的水质指标主要有:溶解氧(DO)、化学需氧量(COD_{Cr})、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₄-N)、总磷(TP)和钾(K)等。测定方法分别为:溶解氧采用便携式溶解氧分析仪(雷磁 JPB-607)进行现场测定,测定之前均用标准液校正;COD_{Cr}采用重铬酸钾法;BOD₅采用稀释接种法;氨氮采用纳氏试剂比色法;总磷采用过硫酸钾消解法;钾采用火焰光度法进行测定。其中,COD、BOD、氨氮、总磷等指标取样后,加入浓硫酸,调节 pH 值 < 2,4℃ 下冷藏。24h 内及时将所有水样送至新疆自治区环境监测站进行检测。

3 结果与分析

各集水区域的水样检测结果见表 2。

3.1 不同集水区域的水质变化特征

3.1.1 大气降水的水质特征

大气降水的水质较好。溶解氧浓度均大于 8.7mg/L,其中 9 月份的浓度最高为 9.3mg/L。COD 的最大浓度为 23mg/L,出现在 7 月份;3 个月的 BOD 检测值范围均在 2—5 mg/L 之间。7、8、9 月的氨氮浓度分别为:0.805、0.479、0.602mg/L,说明大气降水的水质在时间上具有一定的变异性。总磷的含量均在 0.24mg/L 左右,3 次浓度分别为 0.24、0.239、0.242mg/L,变化很小。大气降水 3 次的钾检测结果分别为:3.509、2.841、3.355mg/L,说明空气颗粒物中含有一定量的钾元素。

3.1.2 穿透水的水质变化规律

大气降水经过林冠截留形成林内穿透水,降雨通过对枝叶表面尘埃、物质元素的淋洗、淋溶以及对水质元素的吸收、吸附,使水质发生变化^[10-11]。由表 2 表明,与大气降水检测结果比较,林内穿透水溶解氧含量降低,其余,COD、BOD、氨氮、总磷、钾浓度均成上升趋势。

(1) 郁闭度对穿透水水质的影响

①穿透水的溶解氧值随着郁闭度的增加而减小,大小排列顺序为 0.2(1-2) > 0.4(1-4) > 0.6(1-6) > 0.8(1-8)。说明在同龄林内,郁闭度越大,其枝叶表面所吸附和分泌的有机物质对水质的影响越明显。

②氨氮、COD、BOD 随着森林郁闭度的增加,均呈上升趋势。水中的氨氮主要源于含氮有机物的分解;COD 表征水体中的还原性物质、有机物、微生物含量的多少;BOD 表示水中有机物等需氧污染物质含量。3 个指标均与有机物质紧密相关,因此,郁闭度越大,林冠枝叶截留所受降雨的淋溶面越广,溶入水中的有机物质含量越多。

③磷和钾是溶解性和迁移性极强的元素,在水中极易溶解,极易从林冠中的叶子、枝上溶脱^[12]。森林郁闭度越大,林冠枝叶表面被淋洗和溶解的总磷和钾越多,因此,穿透水中的总磷和钾的浓度随森林郁闭度的增加而增加。

(2) 林龄对穿透水水质的影响

①不同林龄集水区域的穿透水溶解氧浓度大小排列顺序为:幼龄林(4-1) > 中龄林(1-8) > 成熟林(6-1) > 近熟林(5-1)。主要是因为林冠层向降水中输入的枝叶分泌物等对水质具有一定的影响^[13]。由于新、老、枯枝叶的新陈代谢程度不同,枝叶表面分泌物的分量存在差异,分泌物越多,降水中的溶解氧含量越小。对于近熟林林冠截留中的溶解氧含量大于成熟林,可能是因为近熟林的枝叶较为茂盛,树干枯叶、死枝数量较少,枝叶吸附和分泌的物质较多。

②3 次水样中氨氮、COD、BOD 指标的排列顺序相同,均为:幼龄林(4-1) < 中龄林(1-8) < 成熟林(6-1) < 近熟林(5-1),与溶解氧的排列顺序恰恰相反,符合水样的溶解氧低,COD、BOD 一般高的结论^[14]。

③不同林龄的穿透水中总磷和钾浓度均值大小排列为:幼龄林(4-1) < 中龄林(1-8) < 成熟林(6-1) < 近熟林(5-1)。说明林龄越大,林冠枝叶表面吸附和分泌的磷和钾元素成分越高。9 月份幼龄林穿透水中的钾元素含量较高,可能由于降雨过程中,雨水对幼龄林的新叶淋洗相对更加强烈。

表 2 森林生态系统集水区域水质检测结果

Table 2 Water quality indicators of different catchment plots in the forest ecosystem/(mg/L)																	
月份 Months	项目 Items	降水 Rain fall	穿透水 Through fall							地表径流水 Surface runoff						总地下水 Underground water	
		1	1-2	1-4	1-6	1-8	4-1	5-1	6-1	2-2	2-4	2-6	2-8	4-2	5-2		6-2
7	DO	9.1	8.2	8.1	7.2	5.9	5.9	6.1	6.3	7.1	6.3	5.5	5.2	5.6	4.7	5.4	10.4
	COD _{Cr}	23	24	34	50	55	28	157	95	138	153	160	192	64	223	196	<5
	BOD ₅	<5	7	9	15	15	10	88	49	46	56	86	97	25	108	93	<2
	NH ₄ -N	0.805	0.875	1.074	1.672	2.045	1.508	4.661	3.838	0.547	0.813	1.15	1.463	0.805	1.152	1.202	0.095
	TP	0.240	0.270	0.301	0.321	0.370	0.239	0.333	0.450	0.256	0.335	0.928	1.588	0.280	0.736	0.596	0.070
8	K	3.509	3.535	4.383	5.463	6.054	6.054	8.673	7.626	5.731	9.207	9.961	12.74	7.031	10.79	9.207	2.584
	DO	8.7	8.8	8.3	7.5	6.1	7.9	5.1	5.7	7.6	6.9	5.8	5.7	6.8	4.4	5.1	11
	COD _{Cr}	20	26	68	78	99	78	253	112	111	144	197	215	107	453	384	<5
	BOD ₅	<5	6	40	44	54	42	108	54	40	67	111	120	53	233	130	<2
	NH ₄ -N	0.479	0.498	0.85	1.73	2.3	1.62	5.57	6.77	0.4	0.57	1.47	1.41	0.918	1.17	1.42	0.098
9	TP	0.239	0.259	0.270	0.290	0.383	0.239	0.321	0.424	0.266	0.319	1.070	1.757	0.313	0.639	0.547	0.070
	K	2.841	4.635	6.748	7.082	7.982	7.365	8.136	7.931	5.750	9.287	10.913	12.841	8.933	11.041	9.987	2.352
	DO	9.6	8.6	8.5	8.2	7.93	8.6	6.2	7.3	8.5	7.6	6.8	6.6	7	5.5	5.9	10.7
	COD _{Cr}	17	26	35	44	55	40	111	62	92	117	137	145	102	156	144	<5
	BOD ₅	<5	7	10	11	11	13	26	53	30	24	31	39	46	82	61	<2
	NH ₄ -N	0.602	0.63	0.77	1.06	2.05	1.321	3.96	2.583	0.469	0.826	0.917	1.17	1.2	1.421	1.145	0.072
	TP	0.242	0.249	0.271	0.299	0.376	0.240	0.352	0.439	0.249	0.301	0.649	1.654	0.280	0.702	0.702	0.070
	K	3.355	4.820	6.105	6.311	6.987	7.211	8.625	7.361	5.334	9.103	10.681	12.997	9.165	10.347	8.188	2.532

3.1.3 地表径流的水质变化规律

林内穿透水降入地面形成地表径流,地表水主要受林内下垫面植被、枯落物层以及裸地土壤的影响,与冠层类似,对随水分携带穿过其间的各种物质进行着两种相反的过程,即过滤吸附和淋溶。

(1) 郁闭度对地表径流水质的影响

①地表径流水样的溶解氧浓度与森林郁闭度成反比关系(表2)。说明水质主要受枯落物的影响,随着郁闭度的增加,林内枯落物层厚度变大,腐殖质层不断增加,有机质含量越丰富。因此,郁闭度越大,地表径流的溶解氧值越小。

②COD、BOD、氨氮、总磷和钾的检测数据均随森林郁闭度增加而增加(表2),说明云杉所吸收的养分最终以淋溶方式返回到地面,枯落物层越厚,林下土壤的有机质蓄积量越丰富。

(2) 林龄对地表径流水质的影响

地表径流水的溶解氧浓度除了受枯落物层厚度的影响外,还受地表土壤质地的影响,林龄越大,地表蓄积的土壤腐殖质层越厚,所受水分的淋溶性越明显。因此,不同林龄的溶解氧浓度排列顺序为:近熟林 < 成熟林 < 中龄林 < 幼龄林(表2)。

地表径流中 COD、BOD、氨氮浓度的排列顺序为:幼龄林(4-2) < 中龄林(2-8) < 成熟林(6-2) < 近熟林(5-2)。而总磷和钾浓度的变化规律为:幼龄林(4-2) < 成熟林(6-2) < 近熟林(5-2) < 中龄林(2-8)(表2)。这可能是因为成熟林和近熟林中地表枯落物层较厚,径流过程所受的阻力较大,从而导致水分渗透系数较大,降水对林冠层和枯落物层的淋洗过程中,部分的磷和钾滞留在土壤层中。因此,成熟林和近熟林被淋洗出的磷和钾小于中龄林。

3.1.4 总地下渗水的水质特征

总地下渗水的水质比大气降水和林内各层次的水质更优质,溶解氧浓度较高,COD、BOD、氨氮、总磷和钾的含量也明显低于其它水样。溶解氧最小值为 10.4 mg/L;COD 和 BOD 含量分别 ≤ 5 mg/L 和 ≤ 2 mg/L;氨氮、总磷、和钾的最大检测值分别为 0.098、0.07、2.584mg/L。

3.2 降水过程中不同层次的水质效应

3.2.1 林冠层水质影响效应

大气降水透过林冠层,溶解氧浓度减小,而氨氮、COD、BOD、总磷、钾均为上升趋势。溶解氧、氨氮、COD、BOD 变化幅度最大值均出现在 8 月份。其中,溶解氧浓度表现在成熟林(6-1)上,降幅为 3.6mg/L;氨氮、COD、BOD 均表现在近熟林(5-1)上,增幅最值分别为 6.29mg/L、94mg/L 和 48mg/L。这主要是因为 8 月份降雨量较大为 41mm,林冠所受雨水的淋洗和淋溶程度较强烈,因此变化幅度较大。总磷和钾浓度值变化幅度最大值均出现在 7 月份,分别表现在成熟林(6-1)和近熟林(5-1)内,增幅分别为 0.211mg/L、8.314mg/L。可能由于 7 月份林木新陈代谢比较旺盛,生理体内的养分循环较为强烈,枝叶分泌物较多,相对被降水淋溶的磷、钾元素较多。综上说明:森林郁闭度越大,林龄越大,林冠层对水质影响效应越明显。

3.2.2 林下地被层水质影响效应

林内穿透雨降落到地面形成地表径流过程中,林地地表含有丰富的有机质,地表水通过对其进一步淋溶,溶解氧进一步降低,COD、BOD、总磷、钾的含量升高。然而,氨氮浓度较穿透雨中的氨氮浓度仍呈继续降低趋势,说明林内枯落物层对氨氮的具有一定的过滤作用,使水质得到进一步净化。

(1)溶解氧的降幅高达 1.7mg/L,表现在 8 月份 0.6 郁闭度的中龄林内(图1),由于溶解氧受降雨量、雨强、水温、植物光合作用等因素多重影响,本身降雨过程中具有一定的偶然性,变异系数存在差异在所难免。

(2)COD、BOD 浓度变化幅度按林龄和郁闭度的排列,顺序分别为:成熟林 > 近熟林 > 中龄林 > 幼龄林和 $0.8 > 0.6 > 0.4 > 0.2$ (图1)。说明林龄越大,郁闭度越高,林地地表的有机物质蓄积量越大,对水中的 COD 和 BOD 的影响程度越明显。

(3)氨氮浓度降低幅度表现为成熟林最大,0.2 郁闭度的中龄林最小,降幅均为 8 月份的检测值,分别为

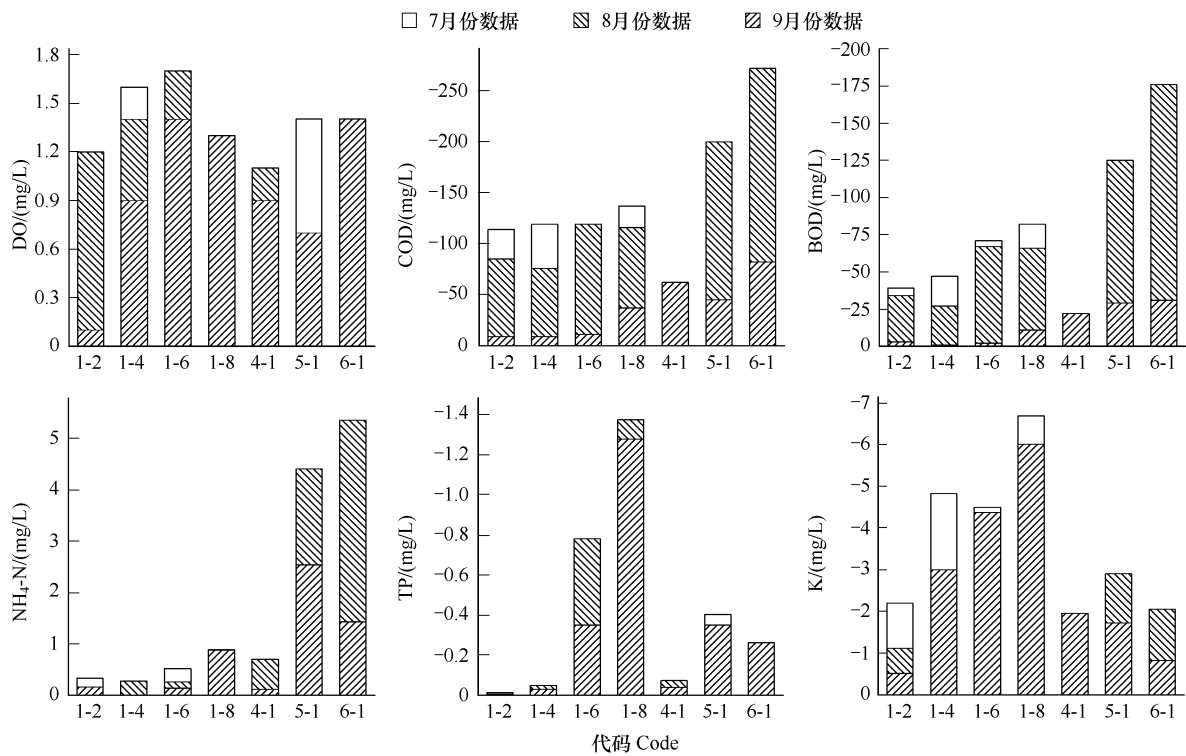


图1 不同林地穿透水与地表径流水质指标差值对比图

Fig. 1 The difference column of water quality between surface runoff and through fall

5.35mg/L、0.10mg/L(图1)。枯枝落叶经微生物分解,氨氮逐渐被枯枝落叶所吸收,地表径流速度越慢,氨氮的吸收效果越明显,因此,林龄较大的林区氨氮浓度降低幅度较小。

(4) 总磷和钾含量上升幅度最值均表现在中林龄内,最大升幅分别为:1.374mg/L(8月份)和为6.686mg/L(7月份)。平均上升幅度与郁闭度成正比,即:0.8(1-8) > 0.6(1-6) > 0.4(1-4) > 0.2(1-2)(图1)。

3.2.3 森林生态系统对水质的影响效应

地下渗水化学物质的形成复杂多变,主要包括:大气降水输入,森林草本的吸收,枯落物层的淋溶和释放,有机物质的腐化、矿化以及离子交换,地下矿质元素的迁移等等^[15]。由表3表明:在穿透水和地表径流水水质降低的前提下,地下渗水的水质较大气降水各项指标均得到不同程度的净化。

表3 降水经过森林生态系统水质变化值

Table 3 The difference of water quality between

月份 Month	DO	COD	BOD	NH ₄ -N	TP	K
7月 July	-1.3	18	3	0.71	0.17	0.925
净化率 Purify ratio/%	-14	78	60	88	71	26
8月 August	-2.3	15	3	0.38	0.169	0.489
净化率 Purify ratio/%	-26	75	60	79	71	17
9月 September	-1.1	12	3	0.53	0.172	0.823
净化率 Purify ratio/%	-11	71	60	88	71	25

注:净化率=(大气降水-总地下渗水)/大气降水

其中,溶解氧净化程度较小,上升范围为1.1—2.3mg/L之间,净化率最大为26%;COD和BOD的净化率分别在71%和60%以上;氨氮的最大降低值为0.71mg/L,净化率为88%;总磷降低幅度约为0.17mg/L,净

化率均为 71% ;可能由于大气降水和地下渗水中的钾元素含量均不大,钾的净化率较小,在 17%—26% 之间。因此,土壤层对原始云杉林生态系统具有很强的水质净化能力和较高的养分蓄积作用,是净化水质效果最好的关键层。

3.3 集水区域水质的综合评价

以上对天山云杉林内不同层次的水质影响效应作了一定的分析,但不同层次的各项水质指标的变化幅度有强有弱,权值排序也较不统一,不能够准确说明各层次水质质量的系统特征。因此,要整体评价各层次对水质影响效应的强弱,需要对所有的水质指标进行定量化综合评价。

关于水质综合评价的方法很多,主要有综合污染指数评价方法、灰色关联分析评价方法、模糊数学评价方法等。但水质系统是一个由多因子构成的复杂系统,水质评价受诸多指标因子的影响,从而使上述方法在进行水质评价时表现出一定的局限性^[16-17]。主成分分析法正是一种将多维因子纳入同一系统中进行定量化研究,理论比较完善的多元统计分析方法^[18]。在水资源和水环境中应用较多的是主成分分析法^[19-20]。主成分分析(PAC)又称为因子分析,其通过少数的几个假想变量以最少的信息丢失将众多的观测变量浓缩为少数几个因子。利用 SPSS17.0 对以上数据通过 KMO 和 Bartlett 球形检验后进行主成分分析。

(1)表 4 KMO 和 Bartlett 球形检验结果说明:KMO 值为 0.755 > 0.6,说明适合因子分析;同样,Bartlett 球形检验结果的相伴概率为 0.000 < 0.05 时,拒绝 Bartlett 球形检验零假设,即适合于作因子分析。

表 4 KMO 检验和 Bartlett 球形检验结果

Table 4 KMO and Bartlett's Test		
检验方法 Test method	检验值 Test value	
KMO 检验 Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy	0.755	
巴特利特球形检验	近似方差 Approx. Chi-Square	261.793
Bartlett's Test of Sphericity	自由度 df	15
	相伴概率 Sig.	0.000

(2)从表 5 中可以看出,主成分因子提取的结果。统计分析将所有检测数据分为两个主成分因子,两个因子变量的方差贡献(特征值)分别为 $A_1 = 3.977$ 和 $A_2 = 1.004$;累积贡献率分别为 66.284% 和 16.782%,合计达到 83.012%,具有一定的整体代表性。结合表 6,即可推知两个主成分因子得分函数。

$$F_1 = -0.158X_{DO} + 0.235X_{COD} + 0.231X_{BOD} - 0.174X_{NH_4-N} + 0.293X_{TP} + 0.263X_K$$

$$F_2 = -0.251X_{DO} + 0.01X_{COD} + 0.032X_{BOD} + 0.87X_{NH_4-N} - 0.322X_{TP} - 0.065X_K$$

表 5 总方差分解表

Table 5 Total Variance Explained						
因子序号 Component	初始特征根 Initial Eigen values			提取的因子载荷平方和 Extraction Sums of Squared Loadings		
	特征根 Eigenvalues	方差贡献率/% Variance	累积贡献率/% Cumulative	特征根 Eigenvalues	方差贡献率/% Variance	累积贡献率/% Cumulative
1	3.977	66.284	66.284	3.977	66.284	66.284
2	1.004	16.728	83.012	1.004	16.728	83.012
3	0.629	10.480	93.492			
4	0.233	3.881	97.373			
5	0.119	1.990	99.364			
6	0.038	0.636	100.000			

(3)各个区域的综合主成分值是通过每个主成分得分与其对应的特征值占所提取主因子总的特征值之和的权重相乘后求和而获得:

$$F = (A_1F_1 + A_2F_2) / (A_1 + A_2)$$

由以上公式计算得到各集水区域水质的综合得分值(F), F 分值越大说明水样的质量越差。

表 7 表明:穿透水和地表径流的水样质量等级排序相同,不同郁闭度和不同林龄的优劣顺序分别为: $0.2 > 0.4 > 0.6 > 0.8$ 和幼龄林 > 中龄林 > 成熟林 > 近熟林,说明森林郁闭度越大,林龄越大,林冠层和林地地表对降水的水质影响越大;按照时间横向对比,3 个月林地各集水区域的水质等级优劣顺序很明显,为 7 月份 > 9 月份 > 8 月份,说明植物的生理特征和降雨量对林内的水质效应具有一定的影响。

3.4 不同空间尺度水质效应的综合评价模型

关于水质评价的模型很多,但用主成分分析法来建立水质评价模型案例却很少。对于水质多因子复杂的灰色系统,利用主成分分析方法(PAC)与监测指标构建模型能很好地评价水质等级。

表 6 因子得分矩阵

Table 6 Component score coefficient matrix		
因子 Factor	主成分 Component	
	1	2
DO	-0.158	-0.251
COD	0.235	0.010
BOD	0.231	0.032
NH ₄ -N	-0.174	0.870
TP	0.293	-0.322
K	0.263	-0.065

表 7 各集水区域水质综合评价得分值

Table 7 The integrated score of water quality in different catchment plots

代码 Code	7 月份数据 July			8 月份数据 August			9 月份数据 September		
	F1	F2	F	F1	F2	F	F1	F2	F
1	5.974447	-1.49477	4.468908	5.21409	-1.66772	3.826951	4.482071	-1.8536	3.205016
3	0.676502	-2.5999	0.016091	0.520686	-2.73542	-0.13563	0.620646	-2.69792	-0.04826
1-2	6.817095	-1.14532	5.212144	7.313492	-1.70647	5.495374	7.599197	-1.51998	5.761082
1-4	9.843942	-0.85602	7.687195	25.61453	0.09064	20.46979	10.74304	-1.27769	8.320069
1-6	15.31764	0.167243	12.26384	28.95552	1.25689	23.37242	13.14836	-0.85049	10.32667
1-8	16.80171	0.81995	13.58033	36.58649	2.545744	29.72503	16.26611	0.183843	13.02447
2-2	43.42076	1.093453	34.88902	35.64479	0.370998	28.53479	27.21502	-0.46349	21.63597
2-4	50.27426	1.739075	40.49122	50.66357	1.641627	40.78241	35.79306	0.287883	28.63643
2-6	59.28855	3.025719	47.94788	73.94745	4.291215	59.90712	42.96878	0.808357	34.47067
2-8	70.26726	3.649564	56.8394	80.99104	4.385581	65.54999	47.35745	0.905907	37.9944
4-1	9.357289	-0.03767	7.463586	28.50894	0.994817	22.96303	15.78433	-0.3242	12.5374
4-2	21.72045	0.191925	17.38103	38.59461	1.178169	31.05273	36.23564	1.157115	29.165
5-1	57.82693	6.238129	47.42838	84.86184	8.919598	69.55447	39.03087	4.021031	31.97408
5-2	79.46372	4.568458	64.36738	162.4702	10.97608	131.9342	57.41287	3.140301	46.47337
6-1	34.11793	3.63691	27.97399	38.92551	6.655157	32.4209	21.96225	1.372477	17.81205
6-2	69.07707	3.834233	55.92633	122.004	7.130011	98.84929	49.15783	2.153336	39.68332

通过以上所获得的各集水区域的综合评价值 $F(Y)$, 结合 $DO(X_{DO})$ 、 $COD(X_{COD})$ 、 $BOD(X_{BOD})$ 、 $NH_4-N(X_{NH_4-N})$ 、 $TP(X_{TP})$ 、 $K(X_K)$ 等参数,构建多元线性回归模型:

$$Y = -0.177X_{DO} + 0.19X_{COD} + 0.191X_{BOD} + 0.036X_{NH_4-N} + 0.169X_{TP} + 0.197X_K$$

该模型相关系数 R^2 达到 1.0, 方差评价 sig. = 0.000 表示极为显著。因此,利用该方法构建的水质综合评价模型,在原始数据信息量丢失最小的情况下,客观性较强,预测精度较高。

4 结论和讨论

通过对天山中部天然云杉林区降水在转化过程中的水质变化规律,以及森林生态系统不同层次对水质的影响分析,结果如下:

(1) 林冠层作为水质影响效应的重要层次之一,其枝叶表面的吸附物及其分泌物的质和量是影响水质的关键所在。大气降水透过林冠层后,溶解氧含量减小,氨氮、COD、BOD、总磷、钾含量增加。林分特征及植物

生理的差异性所引起植物的吸附和分泌物质的变化,可能是导致穿透水水质检测结果误差的关键。因此,空气颗粒物中的化学元素经过森林林冠层后的变化规律,植物枝叶的分泌物的季节性规律,及其对降水的水质影响问题仍需要做进一步的考察和研究。

(2) 穿透水转化为地表径流,溶解氧浓度进一步降低,COD、BOD、总磷、钾的含量升高,氨氮浓度降低,说明森林土壤对营养元素具有较大吸附存储作用^[3]。

(3) 总地下渗水的各项水质指标均明显优于大气降水。通过对比分析,得出土壤层是森林生态系统中净化水质关键层的结论。由于山地森林土壤结构的异质性和复杂性,增加了考察研究的难度,如何确定土壤层的内部结构,选择代表性的典型区域,以及客观地评价不同森林样地以及无林土壤层的水质净化功能,仍是山地森林水文学研究的一项难点。

(4) 天山云杉林生态系统对降雨的水质影响,随郁闭度和林龄增加而增强。在林龄相同的条件下,表现为 $0.2 < 0.4 < 0.6 < 0.8$ 。在郁闭度为 0.8 的条件下,表现为幼龄林 < 中龄林 < 成熟林 < 近熟林。

(5) 通过各集水区域水质指标定量化综合评价,天山云杉林生态系统内的水质质量表现为:7 月份 > 9 月份 > 8 月份。降水的水质受降雨量、天气、植物生理特征、地形等多重因素影响,一般降雨量越大,所监测的误差越小。研究区内 6—8 月份期间,30mm 以上的降雨量平均为 1—2 次/月。因此,以大于 30mm 降雨量的水质变化研究作为研究对象,缩小了降雨量对水质评价结果的误差系数。另一方面,3 次试验时间分别为 7 月 3 日、8 月 6 日和 9 月 14 日,时间间隔较为均匀,也符合研究区云杉林和地被草本不同时间段的生理特性,因此,增强降水时间尺度上变化规律的代表性。

(6) 本文利用主成分分析方法构建的综合评价多元线性模型,具有很强代表性,能很好地用于水质的等级评价。

致谢:本研究得到河北农业大学杨新兵老师指导和帮助。

References:

- [1] Brown W G. Forests and Water//Li C Z, Zhang L H, translation. Beijing: China Forestry Press, 1994: 12.
- [2] Bao W, Bao W K, Ding D R, He B H. Effects of forest vegetation on water chemistry of precipitation. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1): 112-115.
- [3] Zhang S L, Li G L. The effects of different components of the forest ecosystem on water quality in the Huoditang forest region, Qinling Mountain Range. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1838-1844.
- [4] Yan W D, Tian D L. Ecological effect of the water quality in the second-generation Chinese fir plantation at Huitong watersheds. *Journal of Central South Forestry University*, 2003, 23(2): 6-10.
- [5] Zhao Y S, Xin Y, Zeng F S. Influence of the water conservation forest in the headstream of Ashi River on water quality. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(6): 5-9.
- [6] OuYang X J, Zhou G Y, Huang Z L, Huang M H. Analysis on runoff water quality in Dinghushan biosphere reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1373-1379.
- [7] Zhang S L, Li J. Effects of canopy of natural forest on water quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 56-60.
- [8] Brun C B, Åström M E, Peltola P, Johansson M B. Trends in major and trace elements in decomposing needle litters during a long-term experiment in Swedish forests. *Plant Soil*, 2008, 306: 199-210.
- [9] The Forestry Department of XinJiang Uygur Autonomous Region. *Forest Soils of XinJiang Mountain Region*. Urumqi: XinJiang Science Technology and Hygiene Publishing House, 1995: 171.
- [10] Cai Y L, Li F, Li J Y, Chen Y R, Li H T, Zhang H Z. A study on rainfall chemistry of artificial forests in red earth hilly area. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1): 99-104.
- [11] 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. *Eurasian Soil Science*, 2009, 8: 927-939.
- [12] Jiang Y X. *Chinese Forest Ecosystem Structure and Function Study*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996: 348-354.
- [13] Chiwa M, Crossley A, Shepperd L J. Through fall chemistry and canopy interactions in a Sitka spruce plantation sprayed with six different simulated polluted mist treatments. *Environmental Pollution*, 2004, 127: 57-64.

- [14] Environmental Impact Assessment and Management Practice Collection Editorial Board. Environmental Impact Assessment and Management Practice Collection. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008:207-214.
- [15] Lukina N V, Nikonov V V, Gorbacheva T T. Natural water quality formation in forest-covered divide areas in northern Taiga. Water Resources, 2001, 28(4):438-450.
- [16] Yi Y R, Haimit Y, Wang T, Huang J Y, Hu X W, Guli G. Application of principal component analysis in analyzing water quality of Urban Rivers. Arid Zone Research, 2008, 25(4): 497-501.
- [17] Meng X Y, Xu D Q. Fuzzy comprehensive Evaluation model for the assessment of valley water quality and its application. Environmental Protection Science, 2009, 35(2): 92-94.
- [18] Xu J H. Mathematical Methods in Contemporary Geography. Beijing: Higher Education of Publishing House, 2002:37-93.
- [19] Liu D L, Liu X Z. Application of principal component analysis to the comprehensive evaluation of water quality in river. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3):124-128.
- [20] Zhao J Q, Zhang Y. The application of the principal component and cluster analysis on the assessment of the water quality of Baiyang Lake. Environmental Science & Technology, 2009, 32(6C):425-428.

参考文献:

- [1] 乔治 W. 布朗//李昌哲,张理宏译. 森林与水质. 北京:中国林业出版社,1994:12
- [2] 鲍文,包维楷,丁德蓉,何丙辉. 森林植被对降水水化学的影响. 生态环境,2004,13(1):112-115.
- [3] 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. 生态学报,2007,27(5):1838-1844.
- [4] 闫文德,田大伦. 会同第二代杉木林集水区水质生态效应. 中南林学院学报,2003,23(2):6-10.
- [5] 赵雨森,辛颖,曾凡锁. 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,2008,44(6):5-9.
- [6] 欧阳学军,周国逸,黄忠良,黄梦虹. 鼎湖山森林地表水水质状况分析. 生态学报,2002,22(9):1373-1379
- [7] 张胜利,李靖. 天然林冠层的水质效应. 水土保持学报,2006,20(3):56-60
- [9] 新疆维吾尔自治区林业厅. 新疆山地森林土壤. 乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1995:171.
- [10] 蔡玉林,李飞,李家永,陈永瑞,李海涛,张宏志. 红壤丘陵区人工林降水化学研究. 自然资源学报2003,18(1):99-104.
- [12] 蒋有绪. 中国森林生态系统结构与功能规律研究. 北京:中国林业出版社,1996:348-354.
- [14] 《环境影响评价与管理实务大全》编委会编著. 环境影响评价与管理实务大全. 北京:中国水利水电出版社,2008:207-214.
- [16] 伊元荣,海米提·依米提,王涛,黄景炎,胡小韦,古丽格娜. 主成分分析法在城市河流水质评价中的应用. 干旱区研究,2008,25(4):497-501.
- [17] 孟祥宇,徐得潜. 流域水质评价模糊综合评判模型及其应用. 环境保护科学,2009,35(2):92-94.
- [18] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第2版). 北京:高等教育出版社,2002:37-93.
- [19] 刘德林,刘贤赵. 主成分分析在河流水质综合评价中的应用. 水土保持研究,2006,13(3):124-128.
- [20] 赵军庆,张彦. 主成分分析与聚类分析在白洋淀水质评价中的应用. 环境科学与技术,2009,32(6C):425-428.