

DOI: 10.5846/stxb201803230574

杨丽丽, 邢元军, 王彦辉, 文仕知, 李振华. 宁夏六盘山 4 种典型森林伴随降水的无机氮通量变化特征. 生态学报, 2019, 39(8): - .

Yang L L, Xing Y J, Wang Y H, Wen S Z, Li Z H. The spatial variability of inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$) flux with precipitation for four typical forests of the Liupan Mountain of Ningxia, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): - .

宁夏六盘山 4 种典型森林伴随降水的无机氮通量变化特征

杨丽丽^{1,2}, 邢元军³, 王彦辉^{2,*}, 文仕知¹, 李振华²

1 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

3 国家林业和草原局中南调查规划设计院, 长沙 410014

摘要: 在宁夏六盘山香水河小流域, 选择建立了 4 种典型森林的样地, 测定了 2011 年生长季(5 月 24 日—10 月 20 日)大气降水(724.3 mm)、穿透水、干流、枯落物渗透水和主根系层(0—30 cm)土壤渗透水的无机氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)浓度及相应通量的变化。结果表明, 在林外降水转化林下降水中, 各样地林下降水携带的生长季 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 通量(kg/hm^2) (华北落叶松人工林 2.40、华山松次生林 2.37、野李子灌丛 2.29、桦木次生林 2.09) 均明显低于林外降水(3.04), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量(kg/hm^2) (华北落叶松人工林 2.15、桦木次生林 2.14、野李子灌丛 2.09、华山松次生林 1.92) 更显著低于林外降水(4.27)。整体看来, 阔叶林林冠的无机氮吸附(吸收)作用稍高于针叶林。在 4 种森林样地的枯落物层渗透水中, 无机氮浓度变化在 0.68—0.88 mg/L, 稍高于林冠穿透水的无机氮浓度; 4 个样地的枯落物渗透水的无机氮通量(kg/hm^2) (野李子灌丛 4.10、桦木次生林 3.24、华山松次生林 3.22、华北落叶松人工林 2.77) 均低于林下降水。在华山松次生林和华北落叶松人工林的主根系层(0—30 cm)土壤渗透水中, 无机氮浓度均高于枯落物渗透水; 因土壤淋出作用, 华山松次生林和华北落叶松人工林的土壤渗透水的无机氮输出通量分别为 16.34 kg/hm^2 和 18.93 kg/hm^2 , 均显著高于枯落物渗透水的输入通量。整体来看, 林外降水在林地无机氮输入中占有重要地位, 在研究年份生长季, 林冠层和枯落物层的吸附(吸收)作用使降水输入的无机氮通量明显降低, 但主根系层土壤淋出作用显著增大了土壤渗透水携带的无机氮输出通量, 表现为土壤层氮素流失。

关键词: 典型森林; 水文过程; 无机氮; 通量

The spatial variability of inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$) flux with precipitation for four typical forests of the Liupan Mountain of Ningxia, China

YANG Lili^{1,2}, XING Yuanjun³, WANG Yanhui^{2,*}, WEN Shizhi¹, LI Zhenhua²

1 College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Central South Inventory and Planning Institute of Forestry National and Grassland Administration of P.R. China, Changsha 410014, China

Abstract: In this study, 3—4 stand plots of 20 m×20 m to 30 m×30 m were selected from four typical forests located in a small watershed of Xiangshui River, the Liupan Mountain of Ningxia, China, to explore the spatial variability of inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$) fluxes and their relationships with precipitation. The concentration and flux of the inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$) in the infiltration water penetrating the soil of main root layers (0—30 cm) after precipitation,

基金项目: 宁夏“十三五”重大科研项目(QCYL-2018-12); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504602, 2016YFC0501063); 国家自然科学基金项目(41390461, 41230852, 41471029); 中南林业科技大学引进人才项目; 国家林业局宁夏六盘山森林生态站和宁夏回族自治区生态修复与多功能林业综合研究中心资助

收稿日期: 2018-03-23; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyh@caf.ac.cn

the water penetrating tree canopies (that is, canopy infiltration water), run-off water and the water infiltrating humus layers (that is, humus infiltration water) were measured during the growing season (24 of May to 20 of October) of 2011. The results showed that with the atmospheric precipitation of 724.3 mm in the open field, the concentration (kg/hm^2) of inorganic nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) in canopy infiltration water was 2.40 for the plantation of *Larix principis-rupprechtii*, 2.37 for the secondary forest of *Pinus armandii*, 2.29 for the bush of *Prunus salicina*, and 2.09 for the secondary forest of *Betula platyphylla*, respectively, and they all were lower than that in the rainfall of the open field, 3.04. The corresponding $\text{NO}_3^-\text{-N}$ fluxes (kg/hm^2) were 2.15 for the plantation of *Larix principis-rupprechtii*, 2.14 for the secondary forest of *Betula platyphylla*, 2.09 for the bush of *Prunus salicina*, and 1.92 for the secondary forest of *Pinus armandii*, respectively, and also much lower than that in the rainfall of the open field, 4.27. Overall, the canopy adsorption effect of inorganic nitrogen was greater in the broad-leaved forests than in the coniferous forests. Among the four forest types, the humus infiltration water had an inorganic nitrogen concentration range of 0.68—0.88 mg/L , which was slightly higher than those in the canopy infiltration water. The inorganic nitrogen fluxes in the humus infiltration water were 4.10 for the bush of *Prunus salicina*, 3.24 for the secondary forest of *Betula platyphylla*, 3.22 for the secondary forest of *Pinus armandii*, and 2.77 for the *Larix principis-rupprechtii* plantation, respectively, and lower than those in the canopy infiltration water. In both the secondary forest of *Pinus armandii* and the plantation of *Larix principis-rupprechtii*, the concentrations of inorganic nitrogen in the soil infiltration water of the main root layer (0—30 cm) were higher than those in the humus infiltration water. Due to the soil leaching effect, the inorganic nitrogen flux carried by the soil infiltration water of the main root layer was 16.34 kg/hm^2 for the stand of *Pinus armandii* and 18.93 kg/hm^2 for the stand of *Larix principis-rupprechtii*, being obviously much higher than those in the humus infiltration water. In summary, precipitation plays an important role in the inorganic nitrogen fluxes input into the forest soils, and the absorption or up-taking effects of tree canopies and humus layers greatly reduce the amount of the inorganic nitrogen flux into soils through precipitation. However, the soil leaching effect in the main root layers can markedly increase the inorganic nitrogen flux of the soil infiltration water, indicating the loss of the inorganic nitrogens in the forest ecosystems.

Key Words: typical forests; hydrological processes; inorganic nitrogen; flux

降水是向森林生态系统输入元素的重要途径,进入森林后随着与植被和土壤的接触,会发生水量与元素浓度的明显变化,这对森林生长和其服务功能有重要作用^[1-4]。维持元素的循环与平衡,作为森林生态系统重要服务功能之一,其大小与森林植被结构紧密相关,并受森林水文过程影响^[5]。氮素是植物需求量最大的营养元素,也是最常见的生长发育限制因子^[6-8]。伴随大气降水的氮沉降成分主要是铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)及少量可溶性有机氮^[9],其中铵态氮和硝态氮是植物可吸收利用的主要无机氮形态^[10-11]。国内外不少学者研究了 NH_4^+ 和 NO_3^- 沉降与土壤酸化的关系^[12-14]、森林水文过程中的氮素动态^[15-17]及大气降水、林内穿透水和干流中的 NH_4^+ 与 NO_3^- 利用与分布^[18-24]。但在我国西北干旱半干旱地区,关于伴随降水的森林生态系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量变化特征报道很少。

本研究在宁夏六盘山区选择了4种典型森林,测定评价了生长季伴随降水输入转化过程而发生的无机氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)通量变化,以便能为理解当地及类似地区的森林元素循环与养分平衡等相关过程、定量评价森林维持元素循环与平衡的服务功能、预测森林生长等研究提供科学依据。

1 研究区与样地概况

研究地点位于宁夏南端的六盘山自然保护区的香水河小流域,地理坐标为 $109^\circ 9' - 109^\circ 30' \text{E}$, $35^\circ 15' - 35^\circ 41' \text{N}$ 。香水河小流域属黄河二级支流泾河的源区,海拔范围 2060—2931 m。该区属暖温带大陆性季风气候,年均气温 5.8°C ,年降水量 600—800 mm。小流域内森林茂盛,植被良好,森林覆盖率达 72.9%,以天然次

生林居多,主要树种为:华山松(*Pinus armandii* Franch.)、白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、红桦(*Betula albo-sinensis* Buck.)、辽东栎(*Quercus wutaishanica* Blume)、山杨(*Populus davidiana* Dode)等;人工林主要为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)纯林;灌丛以野李子(*Prunus salicina*)为主;亚高山草甸群落分布在海拔 2700 m 以上。区内成土母质为页岩、沙质泥岩、灰岩风化的坡积物和残积物,土壤以灰褐土为主。

本文选择了在小流域内具代表性的 4 种植被类型作为研究对象,即华山松次生林、桦木次生林、华北落叶松人工林及野李子灌丛。在洪沟子流域分别建立了 3—4 个面积 30 m×30 m 的华山松林、桦木林和华北落叶松林固定样地,在草沟子流域建立了 3 个面积 20 m×20 m 的野李子灌丛样地。华山松次生林中混生有少量红桦和白桦,林下植被数量较多,主要有榛(*Corylus heterophylla* Fisch. ex Trautv.)、忍冬(*Lonicera japonica* Thunb.)、冰草(*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.)、峨嵋蔷薇(*Rosa omeiensis* Rolf)、苔草(*Carex* spp.)等。桦木次生林样地由白桦和少量红桦组成,林下植被也较多,主要有箭竹(*Fargesia spathacea* Franch.)、榛、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata* Linn.)、小叶丁香(*Sytinga microphylla* Diels)、忍冬、菝葜(*Smilax china* L.)蕨(*Pteridium aquilinum* (Linn.) Kuhn var. *latiusculum* (Desv.) Underw. ex Heller)等。华北落叶松人工林样地林下植被较少,灌木主要有黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、华西箭竹(*Fargesia nitida* (Mitford) Keng f. ex Yi)等,草本主要有蕨、华北苔草(*Carex hancockiana* Maxim.)等。野李子灌丛样地的林下草本主要由冰草(*Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.)组成,数量较多。各样地基本特征见表 1,土壤理化性质见表 2。

表 1 研究样地的立地和植被基本特征

Table 1 The site condition and vegetation characters of sample plots

样地编号 Plot No.	森林类型 Forest type	海拔 Elevation/ m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope gradient/ (°)	坡位 Slope position	林龄 Stand age/a	林冠 郁闭度 Canopy density	林分密度 Stand density/ (株/hm ²)	平均胸径 Meantree diameter/ cm	平均树高 Mean tree height /m	灌木层 盖度 Shrub coverage/ %	草本层 盖度 Herb coverage/ %
1	华山松次生林	2280	北	35	坡下	43	0.6	675	12.14	6.81	60	15
2	Secondary forest of	2241	东南	45	坡中	42	0.6	800	14.54	10.54	20	10
3	<i>Pinus armandii</i>	2252	北	34	坡中	48	0.6	900	12.53	10.13	50	15
4	桦木次生林	2380	北	30	坡中	45	0.6	725	18.30	9.34	65	10
5	Secondary forest of	2320	北	42	坡下	53	0.4	675	11.24	6.41	80	15
6	<i>Betula platyphylla</i>	2436	西北	40	坡中	56	0.6	725	16.62	11.34	50	10
7	华北落叶松人工林	2320	东南	30	坡下	23	0.8	1125	15.60	13.90	5	40
8	Plantation of	2320	东南	30	坡下	23	0.8	825	15.77	13.35	5	40
9	<i>Larix principis-</i>	2510	西南	35	坡上	20	0.6	825	12.71	11.43	40	15
10	<i>rupprechtii</i>	2240	全向	3	沟底	22	0.8	1300	12.52	14.22	10	70
11	野李子灌丛	2230	西	39	坡中	20	—	—	2.57	1.96	65	70
12	Shrub of	2427	西南	40	坡中	25	—	—	2.93	3.27	55	70
13	<i>Prunus salicina</i>	2379	西南	30	坡下	25	—	—	2.81	3.27	60	75

* 野李子灌丛样地的“平均胸径”和“平均树高”栏目中数据为野李子灌丛的“地径”和高度

2 研究方法

2.1 水样的采集与测定

在 2011 年生长季(5 月 24 日至 10 月 20 日),连续监测了 4 种样地的林外降雨、穿透水、干流、枯落物渗漏水、土壤层渗漏水动态并采集样品。

林外降水量和降水过程用自动气象站(美国,Weatherhawk 公司)配合虹吸式自计雨量计和标准雨量筒测定,同时用 3 个内径 20 cm 的自制雨量筒收集林外降水样品。穿透水的测定和收集是在 4 种样地内选择代表

性地点,在距地面 20 cm 的高度,华山松和桦木林样地分别随机布设 9 个雨量筒,华北落叶松林样地随机布设 12 个雨量桶,野李子灌丛样地随机布设 6 个雨量桶,每次雨后测定水量并取样。

表 2 典型森林样地 0—100 cm 土层的土壤理化性质

Table 2 The physical and chemical properties of the 0—100 cm soil layer of different vegetation plots

植被类型 Sample plot	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	有机 C 含量 Organic C/%	全 N 含量 Total N /%	水解 N 含量 Hydrolysis N/(g/kg)	全 P 含量 Total P/%	全 K 含量 Total K/%	Ca 含量/%	Ca ²⁺ / (g/kg)	Mg 含量/%	Mg ²⁺ / (mg/kg)
华山松次生林 Secondary forest of <i>Pinus armandii</i>	0.83±0.21	4.48±1.56	0.42±0.09	0.28±0.12	0.08±0.01	0.23±0.05	0.75±0.12	4.01±0.29	1.12±0.24	0.49±0.13
桦木次生林 Secondary forest of <i>Betula platyphylla</i>	1.02±0.32	5.35±1.38	0.43±0.13	0.30±0.08	0.06±0.01	0.22±0.03	0.94±0.14	4.09±0.63	1.05±0.08	0.48±0.03
华北落叶松人工林 Plantation of <i>Larix principis-rupprechtii</i>	1.13±0.19	2.78±0.45	0.23±0.07	0.22±0.07	0.09±0.03	0.34±0.12	0.84±0.07	2.98±0.13	1.36±0.09	0.55±0.08
野李子灌丛 Shrub of <i>Prunus salicina</i>	1.07±0.36	1.84±0.46	0.16±0.04	0.12±0.02	0.07±0.02	0.23±0.06	0.81±0.25	3.60±0.53	1.51±0.31	0.51±0.05

干流的测定和收集是按林木径级标准,在华山松、桦木和华北落叶松样地内分别选择 6 棵林木,野李子灌丛选择 5 棵样木,用聚乙烯塑料软管从树干 2 m 高处自上向下蛇形缠绕后引流至开口密封的塑料容器。每次雨后测定容器内水量并采样,单株和林分的干流深依据林冠投影面积换算。

枯落物层渗漏水的收集是在每个样地内选择 5 个样点,尽量不破坏原枯落物的层次结构,把 0.5 m×0.5 m 的原状枯落物整体移放到带小孔的塑料膜上,放置在塑料盆中。每次降雨后测定塑料盆中的枯落物渗漏水并取样。

土壤渗漏水收集仅在华山松林和华北落叶松林样地内进行,随机布设 7 个自制的蒸渗仪(内径 20 cm),蒸渗仪内装填了轻微扰动的 30 cm 厚林地土壤,林地土壤上的枯落物及可能生长的小灌木和草本一并保留。在每次降雨后,测定蒸渗仪底筒收集的土壤渗漏水并取样。

每场降雨后,将多点采集的林外降水及各样地内多点采集的穿透水、干流、枯落物渗漏水及土壤渗漏水分别混合,形成各自的混合水样;另外,在洪沟和草沟小流域分别采集溪水水样。每个混合水样保留 500 mL,在野外用定性滤纸过滤水样后,立即用 pH 计测定 pH 值及电导率。处理后的水样冷冻后及时送往位于北京的中国林科院森林生态环境重点实验室进行处理、保存和分析。NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度用德国 Seal 公司的 AutoAnalyzer3 连续流动分析仪测定。2011 生长季共测定 22 次降雨事件,4 种森林植被类型共取得 440 瓶水样。

2.2 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度计算

各类水样的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 的生长季(5—10 月)平均浓度(C , mg/L 是单场降雨后测定的相应水量(P_i , mm)的加权计算值(式(1)):

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

式中, C_i 为单场降雨后测定的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度(mg/L), n 为测定的降雨次数。

林下降水量=穿透水量+干流量,其 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度平均值是单次测定的穿透水与干流水量的加权平均值。

本研究将森林生态系统结构简化为 3 个作用层:冠层(林冠层+灌草层)、枯落物层、主根系区土壤层(0—30 cm),则伴随降水转化通过各作用层的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 通量(F , kg/hm²)计算式如下(式(2)):

$$F = C \cdot P / 100 \quad (2)$$

式中, P 为通过各作用层的总水量(mm)。

在降水通过各作用层过程中发生水量变化的同时,还会因 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附、交换、洗脱等作用而发生浓度变化,形成各作用层对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量的影响,其计算式如下(式(3)):

$$\Delta F = F_i - F_j \quad (3)$$

式中, F_i 为通过各作用层的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量, F_j 为 F_i 相邻上作用层输入的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量, ΔF 为 F_j 作用层对上面相邻作用层输入通量的影响。

在 Excel 中建立数据库,运用 SPSS 软件进行数据分析。

3 结果与分析

3.1 植被作用下的水流通量变化

2011 生长季的香水河小流域总降水量 724.3 mm,但月份差异较大,集中在 7—9 月(表 3)。

2011 年生长季不同植被的林冠截留量(mm)变化为 86.2—145.6,截留率(%)变化为 11.91—20.11;干流量(mm)变化为 1.3—4.7,干流率(%)变化为 0.18—0.65;穿透水量(mm)变化为 577.3—633.4,穿透水率(%)变化为 79.71—87.44;林下降水量(mm)变化为 578.7—638.1,林下降水率(%)变化为 79.89—88.09。

生长季内各样地的枯落物层渗漏水量(mm)随各月降水量增大而增大,其变化为 368.3—525.0,其中野李子灌丛最大,桦木林最小。华山松林和华北落叶松林在 2011 生长季的 0—30 cm 土壤渗漏水分别为 275.9 mm 和 244.2 mm。

3.2 各水文分量的无机氮质量浓度变化

从表 4 可知,在降水通过森林各作用层时,无机氮浓度发生了变化。林外降水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、总无机氮的平均浓度分别为 0.42、0.59、1.01 mg/L;通过林冠接触树体后,各样地中穿透水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度有所降低,但变化范围不大,分别为 0.36—0.40、0.31—0.37 mg/L;干流中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度也降低,但彼此差别不大,变化在 0.29—0.38 mg/L;干流中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均大幅降低,为 0.03—0.06 mg/L,说明几种森林的树冠和树干对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 吸附作用较强;穿透水和干流中的总无机氮浓度均比林外降水有所降低,在穿透水中变化范围为 0.69—0.76 mg/L,在干流中变化范围为 0.32—0.44 mg/L。

对作为穿透雨和干流之和的林下降水,在穿过整个林冠层后,其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均较林外降水有所降低,因干流量小,其加权平均 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度值与穿透水相同。

枯落物层渗漏水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度,除桦木次生林外,其他 3 种样地均较林下降水有所降低,其浓度变化在 0.30—0.42 mg/L;而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度表现为 4 种样地均较林下降水增大,其浓度变化在 0.38—0.46 mg/L;除华北落叶松林外,其他 3 种样地均表现为枯落物层渗透水的总无机氮浓度高于林下降水。

在 0—30 cm 土层渗漏水中,由于土壤淋溶作用,华山松林和落叶松林的土壤渗透水的无机氮浓度均大幅高于其枯落物层渗漏水。溪水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (0.17—0.21 mg/L)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (0.11—0.12 mg/L)、总无机氮 (0.29—0.32 mg/L) 浓度均低于主根系区土壤层 (0—30 cm) 的渗漏水 and 林外降水,说明深层土壤还存在吸收、吸附或气态逸出等作用。

3.3 林内各作用层的无机氮通量

由表 5 可知,2011 生长季林外降水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、总无机氮的通量分别为 3.04、4.27、7.31 kg/hm²,但在各样地林下降水(穿透水和干流)中均被降低,说明存在林冠层的净吸收或吸附作用。在不同森林植被的林下降水中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 通量(kg/hm²)变化为 2.09—2.40; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量(kg/hm²)变化为:1.92—2.15;总无机氮通量(kg/hm²)变化为:4.23—4.55。

各森林样地枯落物层渗透水的总无机氮通量均低于林下降水,说明枯落物层存在吸附或吸收作用,但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的表现稍有不同,如野李子灌丛的枯落物渗透水的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量大于林下降水。在不同样地枯落物层渗漏水中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 通量(kg/hm²)变化为 1.22—1.79; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量(kg/hm²)变化为 1.55—2.31;总无机氮通量(kg/hm²)变化为:2.77—4.10。

表 3 2011 生长季六盘山主要森林样地的降水通量变化特征

Table 3 Change of rain water flux during growing season 2011 in main forests at Liupan Mountains														
植被类型 Sample plot	月份 Months	降雨量 Precipitation/ mm	林冠截留 Interception		干流 Stemflow		穿透降雨 Throughfall		林下降水 Rainfall under canopy		枯落物层渗漏水 Humus leakage		0—30 cm 土层 土壤渗漏水 Soil leakage	
			截留 量/mm	截留 率/%	干流 量/mm	干流 率/%	穿透雨 量/mm	穿透雨 率/%	降水 量/mm	降水 率/%	渗漏水 量/mm	渗漏水 率/%	渗漏水 量/mm	渗漏水 率/%
华山松次生林 Secondary forest of <i>Pinus armandii</i>	5	0.0	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.4	
	6	83.3	14.3	17.13	0.3	0.39	68.7	82.48	69.0	82.87	40.8	49.00	32.8	39.43
	7	188.0	40.1	21.33	0.4	0.22	147.5	78.45	147.9	78.67	100.5	53.47	29.4	15.62
	8	171.1	14.7	8.58	0.3	0.20	156.1	91.21	156.4	91.42	119.7	69.95	123.3	72.04
	9	232.3	24.9	10.70	0.5	0.22	206.9	89.08	207.4	89.30	143.4	61.72	61.0	26.24
柞木次生林 Secondary forest of <i>Betula platyphylla</i>	10	49.6	8.4	16.98	0.2	0.31	41.0	82.71	41.2	83.02	20.0	40.23	29.0	58.47
	5—10	724.3	102.3	14.13	1.8	0.24	620.2	85.63	622.0	85.87	424.3	58.59	275.9	38.09
	5	0.0	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0			
	6	83.3	17.8	21.33	0.1	0.11	65.4	78.56	65.5	78.67	34.8	41.80		
	7	188.0	35.1	18.66	0.3	0.17	152.6	81.17	152.9	81.34	95.9	51.04		
华北落叶松人工林 Plantation of <i>Larix principis-rupprechtii</i>	8	171.1	31.6	18.47	0.4	0.22	139.1	81.31	139.5	81.53	101.1	59.07		
	9	232.3	52.4	22.54	0.5	0.20	179.5	77.26	179.9	77.46	115.8	49.84		
	10	49.6	8.8	17.81	0.1	0.11	40.7	82.08	40.8	82.19	20.7	41.68		
	5—10	724.3	145.6	20.11	1.3	0.18	577.3	79.71	578.7	79.89	368.3	50.85		
	5	0.0	0		0		0	0	0		0		0.2	
野李子灌丛 Shrub of <i>Prunus salicina</i>	6	83.3	19.2	23.02	0.1	0.09	64.0	76.88	64.1	76.98	34.7	41.60	32.4	38.95
	7	188.0	37.9	20.17	0.5	0.29	149.5	79.54	150.1	79.83	104.7	55.67	23.3	12.40
	8	171.1	25.0	14.60	0.6	0.34	145.5	85.06	146.1	85.40	112.7	65.87	107.8	62.98
	9	232.3	36.6	15.76	1.0	0.44	194.7	83.80	195.7	84.24	135.6	58.39	59.4	25.56
	10	49.6	6.2	12.58	0.3	0.65	43.0	86.78	43.4	87.42	19.5	39.41	21.1	42.63
野李子灌丛 Shrub of <i>Prunus salicina</i>	5—10	724.3	124.9	17.25	2.6	0.35	596.8	82.40	599.4	82.75	407.2	56.22	244.2	33.72
	5	0.0	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0			
	6	83.3	11.6	13.98	0.2	0.21	71.5	85.81	71.7	86.02	45.2	54.27		
	7	188.0	23.4	12.44	1.2	0.63	163.4	86.93	164.6	87.56	136.1	72.40		
	8	171.1	18.6	10.86	1.4	0.81	151.1	88.33	152.5	89.14	139.1	81.32		
野李子灌丛 Shrub of <i>Prunus salicina</i>	9	232.3	28.2	12.14	1.5	0.66	202.6	87.20	204.1	87.86	185.9	80.01		
	10	49.6	4.4	8.91	0.4	0.86	44.8	90.23	45.2	91.09	18.7	37.61		
	5—10	724.3	86.2	11.91	4.7	0.65	633.4	87.44	638.1	88.09	525.0	72.48		

* 观测从 5 月 24 日开始,10 月 20 日结束

表 4 2011 生长季典型森林植被样地水文转化过程中的无机氮平均浓度 (mg/L)

水文分量 Water components	华山松次生林 Secondary forest of <i>Pinus armandii</i>			桦木次生林 Secondary forest of <i>Betula platyphylla</i>			华北落叶松人工林 Plantation of <i>Larix principis-rupprechtii</i>			野李子灌丛 Shrub of <i>Prunus salicina</i>		
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total
林外降水 Precipitation	0.42	0.59	1.01	0.42	0.59	1.01	0.42	0.59	1.01	0.42	0.59	1.01
穿透水 Throughfall	0.38	0.31	0.69	0.36	0.37	0.73	0.40	0.36	0.76	0.36	0.33	0.69
干流 Stemflow	0.29	0.04	0.33	0.36	0.06	0.42	0.38	0.06	0.44	0.29	0.03	0.32
林下降水 Rainfall under canopy	0.38	0.31	0.69	0.36	0.37	0.73	0.40	0.36	0.76	0.36	0.33	0.69
枯落物渗漏水 Humus leakage	0.33	0.43	0.76	0.42	0.46	0.88	0.30	0.38	0.68	0.34	0.44	0.78
土壤渗漏水 Soil leakage	0.60	5.32	5.92				0.72	7.03	7.75			
溪水 Stream water	0.21	0.11	0.32	0.21	0.11	0.32	0.21	0.11	0.32	0.17	0.12	0.29

表 5 2011 年生长季典型森林植被样地降水转化中各作用层的无机氮通量 (kg/hm²)

水文分量 Water components	华山松次生林 Secondary forest of <i>Pinus armandii</i>			桦木次生林 Secondary forest of <i>Betula platyphylla</i>			华北落叶松人工林 Plantation of <i>Larix principis-rupprechtii</i>			野李子灌丛 Shrub of <i>Prunus salicina</i>		
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total
林外降水 Precipitation	3.04	4.27	7.31	3.04	4.27	7.31	3.04	4.27	7.31	3.04	4.27	7.31
林下降水 Rainfall under canopy	2.37	1.92	4.29	2.09	2.14	4.23	2.40	2.15	4.55	2.29	2.09	4.38
穿透水 Throughfall	2.36	1.92	4.28	2.08	2.14	4.22	2.39	2.15	4.54	2.28	2.09	4.37
干流 Stemflow	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
枯落物渗漏水 Humus leakage	1.40	1.82	3.22	1.55	1.69	3.24	1.22	1.55	2.77	1.79	2.31	4.10
土壤层渗漏水 Soil leakage	1.66	14.68	16.34				1.76	17.17	18.93			

对 0—30 cm 土壤层渗漏水,华山松和华北落叶松的生长季 NH₄⁺-N 通量 (kg/hm²) 分别为 1.66、1.76,表现为主根系层土壤的些许 NH₄⁺-N 淋出作用;NO₃⁻-N 通量 (kg/hm²) 分别为 14.68、17.17,均大幅高于枯落物层渗漏水的通量,表现为根系层土壤很强的 NO₃⁻-N 淋出作用。华山松和华北落叶松的土壤渗漏水的总无机氮通量 (kg/hm²) 分别为 16.34、18.93,说明根系层土壤在研究期间有大量的无机氮淋出。

3.4 各作用层间无机氮通量的差别

无机氮通量在各作用层的差别是由降水接触植被表面、枯落物和土壤时发生的无机氮的淋失、吸附和吸收等过程和水量变化所共同导致的。

由表 6 可知,各森林样地林下降水携带的无机氮通量相对林外降水均不同程度减少,即林外降水输入的无机氮多,林下降水输出的无机氮少,林冠层表现为无机氮的净固定作用。NH₄⁺-N 通量减幅 (kg/hm²) 在 0.64—0.95 之间;NO₃⁻-N 通量减幅 (kg/hm²) 在 2.12—2.35 之间;总无机氮通量 (kg/hm²) 减幅在 2.76—3.08 之间。

枯落物层渗漏水与林下降水携带的无机氮通量之差,可指示枯落物层对输入林地的无机氮通量的作用,其值在几种典型森林内均为负值,说明四种森林样地的枯落物层均具有对无机氮的净吸附或净储存的“汇”作用。

华山松林和华北落叶松林主根系层的 0—30 cm 土层的渗漏水中的无机氮通量表现为比枯落物层渗漏水通量均有不同程度的增加,即枯落物层输入的无机氮少,土壤层输出的无机氮多,土壤层表现为无机氮的净淋出作用。其中 NH₄⁺-N 增加了 0.26 kg/hm²和 0.54 kg/hm²,NO₃⁻-N 增加了 12.86 kg/hm²和 15.62 kg/hm²,总无机

氮增加了 13.12 kg/hm²和 16.16 kg/hm²,说明华北落叶松和华山松土壤层具有促进加大输出主根系层的无机氮通量的“源”作用。

表 6 2011 年生长季典型森林植被样地的不同作用层的无机氮通量差别/(kg/hm²)

比较的作用层 Layers to be compared	华山松次生林 Secondary forest of <i>Pinus armandii</i>			桦木次生林 Secondary forest of <i>Betula platyphylla</i>			华北落叶松人工林 Plantation of <i>Larix principis-rupprechtii</i>			野李子灌丛 Shrub of <i>Prunus salicina</i>		
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Total
林下降水-林外降水 Rainfall under canopy-Open field precipitation	-0.67	-2.35	-3.02	-0.95	-2.13	-3.08	-0.64	-2.12	-2.76	-0.75	-2.18	-2.93
枯落物层渗漏水-林下降水 Humus leakage-Rainfall under canopy	-0.97	-0.10	-1.07	-0.54	-0.45	-0.99	-1.18	-0.60	-1.78	-0.50	0.22	-0.28
土壤层渗漏水-枯落物层渗漏水 Soil leakage-Humus leakage	0.26	12.86	13.12				0.54	15.62	16.16			
土壤层渗漏水-林外降水 Soil leakage-Open field precipitation	-1.38	10.41	9.03				-1.28	12.90	11.62			

在本研究中,华山松林和华北落叶松林的土壤层仅考虑到主根系层的 0—30 cm 土层,其土壤渗透水的无机氮通量与林外降水通量的差,可在一定程度上视为森林生态系统对降水输入无机氮的作用。两种森林 NH₄⁺-N 通量均表现为林外降水输入的多,土壤层输出的少,森林对降水输入的通量均表现为净固定作用,其值分别为 1.38 kg/hm²和 1.28 kg/hm²;两种森林 NO₃⁻-N 通量表现为林外降水输入的少,土壤层输出的多,对降水输入的通量均表现净淋出作用,其值分别为 10.41 kg/hm²和 12.90 kg/hm²;两种森林对降水输入的总无机氮通量均表现为净淋出作用,其值分别为 9.03 kg/hm²和 11.62 kg/hm²。

4 讨论与结论

4.1 水流通量的垂直变化特征

在 2011 年生长季(5 月 24 日至 10 月 20 日),林外降水量达 724.3 mm,已超过多年均值(610.0 mm),属湿润年。同期 4 种主要森林植被类型样地的林冠截留率为 11.91%—20.11%,位于大多数国内研究的林冠截留率范围(10%—35%)^[25-26]内,也与全国主要森林平均林冠截留率范围(14.7%—31.8%)^[27]相近;本研究中各月截留率也接近徐丽宏等^[28]报道的 2004—2005 年生长季六盘山主要植被类型的林冠截留结果。各森林植被样地的生长季干流率普遍不高,变化在 0.18%—0.65%,这与研究树种的树干粗细、直立程度、树皮干燥程度等多种因素有关。各样地的穿透水比例变化在 79.71%—87.44%。通过林冠拦截后的林下降水比例变化在 79.89%—88.09%。这些水流通量变化,是降水输入无机氮通量变化的一个重要原因。

各样地的枯落物层进一步拦截林下降水,用于蒸发和植物蒸腾,在华山松次生林和华北落叶松人工林之间,存在枯落物层渗漏水差异,这与各样地的枯落物数量和分解状况等有关。枯落物层的降水拦截量变化在 300.0—317.1 mm,拦截率变化在 41.41—43.78%,则渗漏水量和占空旷地降水的比例分别变化在 407.2—424.3 mm和 50.85%—58.59%。华北落叶松人工林枯落物层厚 5.58 cm,重量为 22.83 t/hm²,华山松人工林枯落物厚 3.47 cm,重量为 24.73 t/hm²^[29],枯落物厚度和重量共同影响了样地的枯落物渗漏水量。枯落物层拦截造成的降水输入损失,也是降水输入无机氮通量变化的一个重要原因。

在 0—30 cm 土层,由于土壤蒸发和植物蒸腾,降水输入进一步被消耗,土壤渗漏水占空旷地降水比例进一步减小。华山松、华北落叶松林冠层(树枝+树叶)生物量分别为 30.73、14.47 t/hm²;林下植被生物量分别

为 7.30、7.50 t/hm²^[30],从林冠层和林下植被层生物量看来,华山松林的土壤渗漏水量应小于华北落叶松林。在本文研究的生长季内,华山松林的渗漏量为 275.9 mm,高于华北落叶松林的 244.2 mm,这与立地条件、土壤机械组成及森林植被生长情况和耗水多少等多种因素相关。需专门指出的是,由于测定方法是基于微型蒸渗仪,切断了树木根系,而且没有包括整个主根系层(0—60 cm),所以测定到的渗漏水数值比真正的林地渗漏水会偏大很多。基于曹恭祥在六盘山的研究^[31],华山松次生林和华北落叶松森林生态系统的林地蒸散占生长季同期降雨量的比例为 21.07%和 30.4%,据此可估算本文华山松和华北落叶松林的林地蒸散值为 152.7 mm 和 220.3 mm,高于本研究中实测的华山松和华北落叶松林的蒸渗仪测定值(148.4 mm 和 163.0 mm),则对应的土壤渗漏水应该为 271.6 mm 和 186.9 mm,可见存在着蒸渗仪测定方法高估土壤渗漏的不足。

4.2 各水文分量的无机氮质量浓度与变化

本研究中,林外降水的 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 浓度分别为 0.42 mg/L 和 0.59 mg/L,相较于国内外一些研究地点降水中的无机氮浓度^[18-24](表 7)来说,低于吉林长白山^[20]和重庆四面山^[21]、高于江西千烟洲^[22]。

表 7 一些研究地点降水转化中的无机氮浓度/(mg/L)

Table7 Concentration of inorganic nitrogen concentration in the rainwater flowing through forests at some study sites

实验地点 Site	森林类型 Forest type	降雨量/mm	测定项目 Testing	林外降水 Precipitation	穿透水 Throughfall	干流 Stemflow	枯落物渗漏水 Humus leakage	参考文献 References
大兴安岭	白桦林	439.4	NO ₃ ⁻ -N	0.247	0.145	0.074	7.504	[18]
大兴安岭	兴安落叶松林	460.8	NH ₄ ⁺ -N		0.037	0.145		[19]
			NO ₃ ⁻ -N		0.388	0.335		
			TIN		0.425	0.48		
吉林长白山	森林生态系统	810.3	NH ₄ ⁺ -N	1.43				[20]
			NO ₃ ⁻ -N	1.118				
			TIN	2.548				
重庆四面山	常绿阔叶林	1222	NH ₄ ⁺ -N	0.97	1.34			[21]
			NO ₃ ⁻ -N	1.21	0.73			
			TIN	2.18	2.07			
江西千烟洲	人工针叶林	1034.6	NH ₄ ⁺ -N	0.09				[22]
			NO ₃ ⁻ -N	0.067				
			TIN	0.157				
四川平武	白桦林	805.3	NH ₄ ⁺ -N	0.63±0.21	0.26±0.18	0.89±0.43		[23]
			NO ₃ ⁻ -N	0.16±1.70	1.71±0.79	2.91±1.20		
			TIN	0.79	1.97	3.8		
	岷江冷杉林		NH ₄ ⁺ -N	0.63±0.21	0.59±0.3	0.78±0.24		
			NO ₃ ⁻ -N	0.16±1.70	2.73±1.38	3.89±1.42		
			TIN	0.79	3.32	4.67		
	紫果云杉林		NH ₄ ⁺ -N	0.63±0.21	0.44±0.19	2.65±1.07		
			NO ₃ ⁻ -N	0.16±1.70	1.21±0.55	4.08±1.72		
			TIN	0.79	1.65	6.73		
Lower Austria	山毛榉	929	NH ₄ ⁺ -N	0.5	0.9			[24]
			NO ₃ ⁻ -N	2.12	4.36			
			TIN	2.62	5.26			
	云杉	929	NH ₄ ⁺ -N	0.5	0.32			
			NO ₃ ⁻ -N	2.12	1.82			
			TIN	2.62	2.14			
	山毛榉×云杉	929	NH ₄ ⁺ -N	0.5	0.73			
			NO ₃ ⁻ -N	2.12	3.33			
			TIN	2.62	4.06			

* TIN = NH₄⁺-N + NO₃⁻-N

与六盘山主要森林植被的 TOC 浓度在降水对淋洗和冲刷树体表面后的变化不同^[5], 本研究中, 六盘山 4 种典型森林植被的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在林外降水转为穿透水和干流的过程中均有所降低。降水通过林冠层后, 4 种森林类型穿透降水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化在 0.36—0.40 mg/L, 与四川平武研究地点的研究结果表现一致^[23]; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化在 0.31—0.37 mg/L, 与大部分研究地点的结果不同, 与澳大利亚中部云杉林^[24] 表现出的规律一致, 这可能和六盘山所处的地理位置、降水量、大气中的 N 含量以及植被类型的差异有关。六盘山 4 种森林类型干流的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化在 0.29—0.38 mg/L, 较林外降水有所降低, 与四川平武几种森林植被变化规律不同^[23]。六盘山 4 种森林类型干流的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化在 0.03—0.06 mg/L, 较林外降水有大幅降低, 与大兴安岭白桦林^[18] 变化趋势一致, 与四川平武的白桦林、岷江冷杉林、紫果云杉林^[23] 变化规律不同。这些规律差别, 可能既与树种形态特征有关, 也与区域降水特征有关^[32]。六盘山 4 种森林类型枯落物渗漏水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度低于大兴安岭白桦林^[18], 这可能与枯落物的组成、厚度、分解速率有关。对六盘山华山松、华北落叶松、桦木和野李子灌丛的研究中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在土壤渗漏水中均为最高。

4.3 林内各作用层的无机氮通量与变化

本研究期间林外降水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量分别为 3.04 kg/hm² 和 4.27 kg/hm², 高于在大兴安岭^[18-19] 和低于在吉林长白山^[20]、我国南方地区及下奥地利州^[21-24] 的测定结果。

在六盘山 4 种典型森林植被中, 随降水穿过林冠和植被表面发生的淋洗、冲刷、吸收、吸附等作用发生, 生长季内的雨水无机氮浓度发生了变化, 并在不同树种林分间差别明显。在林外降水转为穿透水和干流过程中, 华山松林、华北落叶松林、桦木林、野李子灌丛的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度有些降低, 但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度以更大的程度降低, 说明树冠对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有净吸收/吸附作用。穿透降水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 通量变化在 2.08—2.39 kg/hm², 与下奥地利州 3 种林分表现的规律不同^[24]; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量变化在 1.92—2.15 kg/hm², 与大兴安岭白桦林^[18] 表现的规律一致, 和下奥地利州 3 种林分不同^[24]; 总无机氮通量变化在 4.22—4.54 kg/hm², 高于四川平武白桦林、低于四川平武岷江冷杉和紫叶云杉林^[23] 以及下奥地利州 3 种林分^[24]。六盘山 4 种森林类型干流的无机氮通量很小, 仅为 0.01 kg/hm², 高于四川平武的紫果云杉林^[23], 低于四川平武的白桦林和岷江冷杉林^[23]。研究表明澳大利亚中部针阔混交林内 TIN(总无机氮) 浓度和沉降量主要受到降水量影响^[24]。六盘山 4 种森林植被与其他研究地点存在差别, 可能是由地域差别引起的降雨量不同和大气湿沉降中的氮含量不同导致的。整体看来, 林冠的无机氮净吸附作用在桦木林内较大, 在华山松和华北落叶松内稍弱, 其原因可能是阔叶树的叶面较大, 与针叶树林冠相比较易拦截和储存干沉降, 或阔叶树的叶片革质化程度高从而被雨水浸出无机氮较少等, 其具体原因有待继续深入研究。

在林下降水转为枯落物层渗漏水后, 除桦木次生林外, 其余 3 种林分的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较林下降水有所降低, 4 种林分的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均较林下降水增大, 无机氮通量变化在 2.77—4.10 kg/hm², 均低于林外降水和林下降水的无机氮通量, 表现为枯落物层无机氮输入多, 输出少。说明 4 种植被的枯落物层也有对无机氮的净吸附作用。

有研究表明, 积雪融水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 大都进入土壤无机氮库^[33], 六盘山华山松林和华北落叶松林的 0—30 cm 土壤渗漏水无机氮通量远高于林外降水、林下降水和枯落物渗漏水通量, 表现为土壤层无机氮输入少, 输出多。说明在 0—30 cm 土壤层对无机氮有净淋出作用, 土壤层对输出主根系层的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 通量具有净淋出的“源”作用。本研究生长季降水量偏高, 是可能造成林地土壤层在生长季内的无机氮大量淋出的原因。

在本文中, 由于没有考虑大量落叶归还给土壤的无机氮输入, 尤其是秋后的大量集中落叶, 也没有考虑干沉降氮输入以及植物固氮作用, 还有非生长季的氮输入与输出, 所以还不能说是森林生态系统或森林根系层土壤的年元素平衡意义上的净氮流失, 仅是一个生长季的过程特点或行为, 需要进行后续深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Lindberg S E, Lovett G M, Richter D D, Johnson D W. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. Science, 1986,

- 231(4734): 141-145.
- [2] Melillo J M, Mcguire A D, Kicklighter D W, Moore B, Vorosmarty C J, Schloss A L. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [3] 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [4] Puckett L J. Estimates of ion sources in deciduous and coniferous throughfall. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1990, 24(3): 545-555.
- [5] 杨丽丽, 王彦辉, 杜敏, 于澎涛, 郝佳, 李振华. 六盘山典型森林伴随降水的总有机碳(TOC)通量变化特征. *生态学报*, 2014, 34(21): 6297-6308.
- [6] Crawford N M, Glass A M. Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants. *Trends in Plant Science*, 1998, 3(10): 389-395.
- [7] 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究. *生态科学*, 1998, 17(2): 37-42.
- [8] Majerowicz N, Kerbaux G B, Nievola C C, Suzuki R M. Growth and nitrogen metabolism of *Catasetum fimbriatum* (orchidaceae) grown with different nitrogen sources. *Environmental and Experimental Botany*, 2000, 44(3): 195-206.
- [9] 郑世伟. 大气氮沉降背景下的天目山森林生态系统水文特征的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [10] Glass A D M, Britto D T, Kaiser B N, Kinghorn J R, Kronzucker H J, Kumar A, Okamoto M, Rawat S, Siddiqi M Y, Unkles S E, Vidmar J J. The regulation of nitrate and ammonium transport systems in plants. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(370): 855-864.
- [11] 崔晓阳, 宋金凤. 原始森林土壤 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 生境特征与某些针叶树种的适应性. *生态学报*, 2005, 25(11): 3082-3092.
- [12] Goulding K W T, Bailey N J, Bradbury N J, Hargreaves P, Howe M, Murphy D V, Poulton P R, Willison T W. Nitrogen deposition and its contribution to nitrogen cycling and associated soil processes. *New Phytologist*, 1998, 139(1): 49-58.
- [13] Bergkvist B O, Folkeson L. Soil acidification and element fluxes of a *Fagus sylvatica* forest as influenced by simulated nitrogen deposition. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, 65(1/2): 111-133.
- [14] Skeffington R A. Accelerated nitrogen inputs – a new problem or a new perspective? *Plant and Soil*, 1990, 128(1): 1-11.
- [15] 黄忠良, 丁明懋, 张祝平, 蚁伟民. 鼎湖山季风常绿阔叶林的水文学过程及其氮素动态. *植物生态学报*, 1994, 18(2): 194-199.
- [16] 覃芳华, 王彬, 王云琦, 孙素琪, 刘李紫渊, 于雷. 重庆缙云山三种典型林分穿透水和树干茎流中氮素特征研究. *土壤通报*, 2014, 45(4): 884-891.
- [17] 徐冯迪, 高扬, 董文渊, 郝卓, 徐亚娟. 我国南方红壤区氮磷湿沉降对森林流域氮磷输出及水质的影响. *生态学报*, 2016, 36(20): 6409-6419.
- [18] 刘茜, 满秀玲, 田野宏. 白桦次生林降水化学及养分输入特征. *北京林业大学学报*, 2015, 37(8): 83-89.
- [19] 关俊祺. 大兴安岭北部兴安落叶松林降水化学特征研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [20] 周旺明, 郭焱, 朱保坤, 王晓雨, 周莉, 于大炮, 代力民. 长白山森林生态系统大气氮素湿沉降通量和组成的季节变化特征. *生态学报*, 2015, 35(1): 158-164.
- [21] 孙涛. 四面山森林生态系统不同层次对大气降水中几种离子的截留特征[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [22] 盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 刘允芬, 胡中民. 离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例. *生态学报*, 2010, 30(24): 6872-6880.
- [23] 巩合德, 王开运, 杨万勤. 川西亚高山 3 种森林群落穿透雨和茎流养分特征研究. *林业科学*, 2005, 41(5): 14-20.
- [24] Berger T W, Untersteiner H, Schume H, Jost G. Throughfall fluxes in a secondary spruce (*Picea abies*), a beech (*Fagus sylvatica*) and a mixed spruce-beech stand. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(3/4): 605-618.
- [25] Zhang G, Zeng G M, Jiang Y M, Huang G H, Li J B, Yao J M, Tan W, Xiang R, Zhang X L. Modelling and measurement of two-layer-canopy interception losses in a subtropical evergreen forest of central-south China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(1): 65-77.
- [26] Whitehead D, Kelliher F M. A canopy water balance model for a *Pinus radiata* stand before and after thinning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, 55(1/2): 109-126.
- [27] Wei X, Liu S, Zhou G, Wang C. Hydrological processes in major types of Chinese forest. *Hydrological Processes*, 2005, 19(1): 63-75.
- [28] 徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛. 六盘山主要植被类型冠层截留特征. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2487-2493.
- [29] 杨丽丽. 六盘山四种典型森林植被的水文过程与主要元素通量[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [30] 杨丽丽, 王彦辉, 文仕知, 刘延惠, 杜敏, 郝佳, 李振华. 六盘山四种森林生态系统的碳氮储量、组成及分布特征. *生态学报*, 2015, 35(15): 5215-5227.
- [31] 曹恭祥. 六盘山香水河小流域植被结构水文影响及其坡面尺度效应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [32] Inagaki M, Sakai M, Ohnuki Y. The effects of organic carbon on acid rain in a temperate forest in Japan. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, 85(4): 2345-2350.
- [33] Williams M W, Brooks P D, Mosier A, Tonnessen K A. Mineral nitrogen transformations in and under seasonal snow in a high-elevation catchment in the Rocky Mountains, United States. *Water Resources Research*, 1996, 32(10): 3161-3171.