

氮添加对亚高山针叶林土壤结构及水分入渗性能的影响

郭海云^{1,2}, 王根绪^{1,2}, 孙守琴^{1,2}

(1.四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,成都 610065;2.四川大学水利水电学院,成都 610065)

摘要: 为探究大气氮沉降增加导致的土壤团聚体结构变化规律及其对土壤水分入渗性能的影响,在贡嘎山针叶成熟林和中龄林内分别设计 2 种氮肥形态 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4\text{、KNO}_3]$ 和 4 个浓度水平(0,10,20,40 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)N)的添加试验,研究不同形态大气氮沉降对亚高山森林土壤团聚体结构和土壤水分入渗特征的影响。结果表明:(1)随施氮量增加,中龄林土壤大团聚体含量逐渐增加,土壤持水量、孔隙度和水分稳定入渗率逐渐增大;成熟林土壤大团聚体含量、土壤持水量、孔隙度和水分稳定入渗率均表现出先增加后降低的趋势;(2)不同形态氮添加对土壤团聚体结构、孔隙度及水分稳定入渗率的作用无显著差异;(3)土壤持水能力、孔隙度和团聚体结构是土壤入渗性能的主要影响因子,外源氮添加增加中龄林土壤持水量和孔隙度,改善中龄林土壤团聚体结构稳定性和水分入渗性能。

关键词: 氮沉降; 团聚体结构; 水分入渗; 林龄; 亚高山针叶林

中图分类号:S152.72

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)01-0238-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.031

Effects of Nitrogen Addition on Soil Structure and Water Infiltration of Subalpine Coniferous Forest

GUO Haiyun^{1,2}, WANG Genxu^{1,2}, SUN Shouqin^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University,

Chengdu 610065; 2.College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065)

Abstract: In order to investigate the changes in soil aggregates due to increased atmospheric nitrogen deposition and its effect on soil water infiltration, two kinds of nitrogen fertilizer ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and KNO_3) with four concentration levels (0, 10, 20, 40 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$) N) were respectively added in mature and middle-aged coniferous forests at Mount Gongga, aims to investigate the effect of different forms of atmospheric nitrogen deposition on the structure of soil aggregates and the infiltration characteristics of soil water in a subalpine forest. The results showed that: (1) With the increase of nitrogen application, the proportion of large macroaggregate, soil water holding capacity, soil porosity and water stable infiltration rate in middle-aged stands gradually increased; the proportion of large macroaggregate, soil water holding capacity, soil porosity and water stable infiltration rate in mature stands showed a trend of first increasing and then decreasing; (2) The effects of different nitrogen forms on soil aggregate structure, soil porosity and water stable infiltration rate showed no significant difference; (3) Water infiltration was mainly affected by water holding capacity, soil porosity and aggregate formation. Nitrogen addition increased water holding capacity and soil porosity, and enhanced soil aggregation and water infiltration in middle-aged stands.

Keywords: nitrogen deposition; soil aggregate formation; water infiltration; stand age; subalpine coniferous forest

土壤水分入渗是森林生态系统水文循环的重要环节之一,是森林水源涵养功能的主导因子,对森林的水文生态效应有直接影响,清楚认识森林土壤水分下渗性能和入渗规律是正确理解流域产流机制的基

础和前提^[1]。土壤团聚体和孔隙度是土壤结构的基本单位,根据粒径大小,土壤团聚体可分为大团聚体($>2\,000\,\mu\text{m}$)、中团聚体($2\,000\sim250\,\mu\text{m}$)、微团聚体($53\sim250\,\mu\text{m}$)和粉黏粒($<53\,\mu\text{m}$)^[2]。不同大小的

团聚体及其空间分布和稳定性,决定土壤孔隙的大小和分布状况^[3],继而影响土壤水分入渗性能^[4]。随着农业扩张、化肥施用、生物质燃烧等人类活动的增加,含氮污染物的排放量逐渐增大,使得大气氮沉降量在近几年呈现快速上升的趋势。1860—1995 年全球大气氮沉降量从 34 Tg/a 增加到 100 Tg/a;而且这一数量目前还在继续增加,预测^[5]表明,到 2050 年大气氮沉降量将达到 200 Tg/a。不断增加的大气氮沉降量,促进陆地生态系统生产力的提升^[5],同时也导致生态系统群落结构变化、土壤酸化、土壤碳氮库^[6]以及土壤团聚体结构和稳定性^[7]等的变化。目前,关于氮沉降对土壤团聚体组成和结构的影响研究也已在全球范围内广泛开展^[6-8],这些研究普遍表明,加氮促进大团聚体含量增加,减少粉黏粒含量,使土壤团聚体平均重量直径显著增加,团聚体稳定性随之增强^[9]。虽然如此,关于氮沉降增加条件下森林土壤团聚体结构的变化如何影响土壤水分入渗性能的相关研究还非常缺乏。

本研究以青藏高原东缘亚高山针叶林为对象,通过野外氮肥添加试验,研究大气氮沉降增加对针叶林土壤团聚体组成及土壤水分入渗性能的影响,为分析全球变化背景下亚高山森林水文循环过程变化提供基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贡嘎山东坡海螺沟亚高山暗针叶林,地理坐标 29°32′59″—29°34′21″N,101°58′13″—101°59′42″E,海拔 2 800~3 200 m。该区气候主要受东南季风影响,潮湿多雨,冬暖夏湿,云雾多,日照少,属亚热带山地湿润型季风气候。据历年气象观测资料,多年平均降水量为 1 940 mm,年雨日 260 天左右,降水季节性变化显著,分为湿季(5—10 月)和干季(11 月至翌年 4 月),其中 60% 的降水集中在 6—9 月。冬季积雪深 50 cm,融雪期在 3—4 月。年均气温 4.0℃,1 月平均气温最低(−4.4℃),7 月平均气温最高(11.9℃),气温年较差大,日较差小。年平均风速约 0.5 m/s,低风速使得年蒸发量很小(约 300 mm),年平均空气相对湿度 90%^[10]。该区土壤的成土母质以花岗岩和砂板岩残坡积物与花岗岩冰碛物为主,土质为山地黄棕壤和山地暗棕壤,砂砾等新生体含量高,黏粒含量低。土层较薄,有机层(O)的平均深度约为 8 cm,腐殖质含量高并具有良好的团粒结构^[7]。研究区内的植被受人类活动影响较小,成分以峨眉冷杉(*Abies fabri* (Mast.) Craib)等针叶树种和杜鹃(*Rhododendron* spp.)等灌丛为主。优势树种为峨眉冷杉,分为成熟针叶林和未成熟针叶林。林下地被物层发育,有大量的苔藓层覆盖,主要为赤茎藓(*Pleu-*

rozium schreberi (Brid.) Mitt.), 锦丝藓(*Actinohydium hookeri* (Mitt.) Broth.)等。该地区大气氮沉降量约为 8.0 kg/(hm²·a) N^[11]。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计。于 2016 年 9 月在海螺沟不同林龄针叶林(成熟林、中龄林)分别设置研究样地,样地大小为 100 m×100 m,样地四周用围栏保护。在每个样地内随机选择 7 个位置建立样方,样方大小 5 m×5 m,样方间距至少大于 5 m,以避免不同处理相互干扰。在样方内分别进行氮肥添加试验,涉及的氮化合物包括 NH₄⁺—N(NH₄)₂SO₄和 NO₃[−]—N(KNO₃)₂ 2 种类型,每种类型分别设置对照(0 kg/(hm²·a)N)、低氮(10 kg/(hm²·a)N)、中氮(20 kg/(hm²·a)N)和高氮(40 kg/(hm²·a)N) 4 种浓度。每种氮肥每个浓度均设置 3 个重复,合计 21 个样方。

自 2016 年 9 月开始,每月月初将相应剂量氮素称重并溶于 650 mL 水中,采用喷雾器均匀喷洒于各个样方内。对照样方喷洒等量的蒸馏水以去除水分增加对土壤的影响。根据贡嘎山大气氮沉降特征(大气氮沉降总量 8 kg/(hm²·a)N,80% 发生在生长季;大气氮沉降以 NH₄⁺ 为主,近年 NO₃[−] 比例逐渐增加^[12]),氮添加处理于每年 5—10 月共分 6 次喷施以施加总氮量的 80%,11 月施加其余 20%,以模拟未来大气氮沉降增加对亚高山针叶林生态系统土壤的影响。

1.3 样品采集

于 2020 年 7 月用直径为 5 cm 的土钻从样方内采集土壤样品。去除地表凋落物和腐殖质层后,每个样方按照对角线法采集 0—10 cm 的原状矿质土壤,同层土壤 3 钻混合作为 1 个土壤样品。将土壤样品保存在装有冰袋的冷藏箱,带回实验室后,剔除石块及根系、蚯蚓等动植物残体,将较大的土块沿着自然断裂面掰成直径约为 1 cm 的小块,充分混匀后在实验室自然风干,用于团聚体分级和组成测定。另外用环刀采集原状土,用于水分入渗试验和孔隙度等土壤性质分析。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 土壤结构和碳氮含量分析 土壤含水率采用烘干法(105℃,48 h)测定;土壤容重和孔隙度相关指标采用环刀法^[13]测定;土壤总碳和土壤全氮含量使用碳氮分析仪测量。

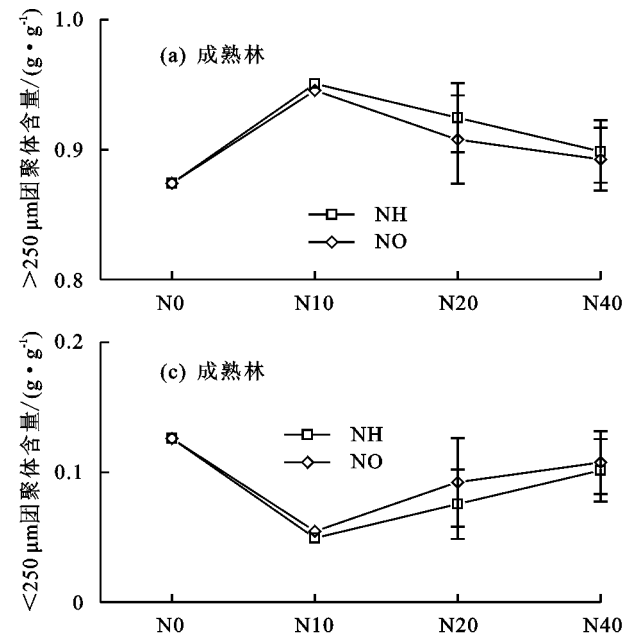
土壤团聚体分离采用湿筛法^[14],利用湿筛仪以及 2 000,250,53 μm 套筛进行筛分(TTF-100 型土壤团粒分析仪,浙江省上虞市舜龙实验仪器厂)。取 200 g 过 8 mm 筛的风干土样,于室温下在 2 L 烧杯中用 500 mL 去离子水润湿 10 min 后放在套筛最上层(按孔径由大到小、从上到下放置套筛)。将套筛置

于盛有蒸馏水的分析桶中固定好,启动仪器,设置垂直振幅3 cm,按照 2 min 振荡 50 次^[8]的频率持续筛分 30 min。筛分结束后去除漂浮在水面上的杂质,将留在各筛网上的团聚体用蒸馏水回洗入烧杯中,于 60 ℃烘箱中烘干至恒重后称量,从而得到的团聚体分别为大团聚体(>2 000 μm)、中团聚体(2 000~250 μm)、微团聚体(53~250 μm)和粉黏粒(<53 μm)。

1.4.2 土壤渗透性指标测定 土壤入渗速率测定采用室内环刀法^[15]。将装有原状土样的环刀下端换为内垫滤纸的开孔底盖,将该端浸泡在去离子水中 48 h,浸泡时水面不超过环刀上缘,以免造成对土壤原状结构的破坏而影响结果的测定。浸泡后将环刀取出,在上端增加一空环刀,接口处用胶带封好后放在漏斗上,漏斗下方用烧杯承接。用马氏瓶向空环刀加水使水层厚度为 5 cm,保持水面比上部的环刀口低 1 mm。自漏斗底部滴下第 1 滴水时开始计时,计时开始后在 1,2,3,5,10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60 min 时用天平称量渗下的水量。前 5 min 的平均入渗速率作为初始入渗率,连续 3 次相同时间间隔内渗下的水量相同时认为达到稳渗。试验持续到稳定入渗时为止。

1.5 数据处理

使用 Excel 2019 软件进行数据整理,SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和主成分分析。利用 Origin 2018 软件进行绘图,用 R 语言(3.6.2)corrplot 包进行相关性分析。



注: NH 表示添加(NH₄)₂SO₄; NO 表示添加 KNO₃; N0、N10、N20、N40 分别表示施氮浓度为 0、10、20、40 kg/(hm²·a)N。下同。

图 2 氮添加下成熟林与中龄林土壤团聚体结构变化特征

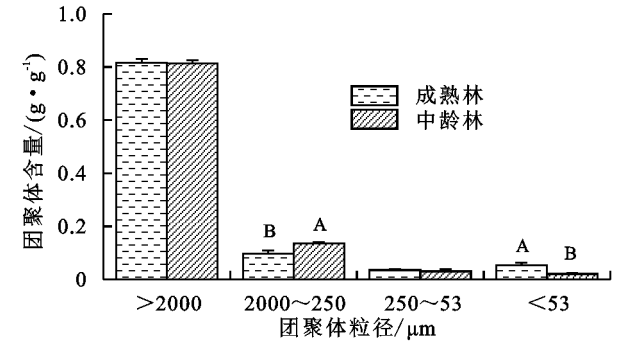
2.2 氮添加对不同龄林土壤容重、持水量和孔隙度的影响

亚高山针叶林不同龄林土壤持水量和孔隙度

2 结果与分析

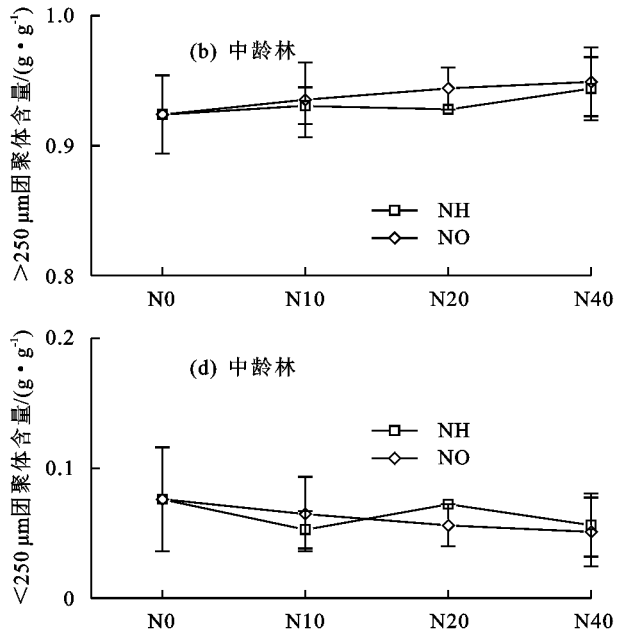
2.1 氮添加对不同龄林土壤团聚体结构的影响

无论是成熟林还是中龄林,土壤团聚体结构基本符合大团聚体含量>中团聚体含量>微团聚体含量的规律,但具体组成在不同龄林间具有显著差异(图 1, $p<0.05$)。成熟林土壤大粒径团聚体(>250 μm)含量显著低于中龄林,小粒径团聚体(<250 μm)含量高于中龄林。随施氮量增加,中龄林土壤大粒径团聚体含量逐渐增加,小粒径团聚体含量逐渐降低。成熟林土壤大粒径团聚体含量则呈现出先增加后降低的趋势,最大值出现在 10 kg/(hm²·a)N 水平;对应地,小粒径团聚体含量先降低后增加,10 kg/(hm²·a)N 水平时出现最小值。不同形态氮添加对土壤团聚体结构的作用无显著差异(图 2)。



注: 数据结果为平均值±标准误差;不同大写字母表示林龄间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同林龄针叶林土壤各粒级团聚体含量



具有显著差异($p<0.05$),成熟林与中龄林相比其土壤具有较高的最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度和总孔隙度(图 3 和图 4)。随施氮量增加,中龄林

土壤最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度和总孔隙度逐渐增加;成熟林土壤最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度和总孔隙度则表现出先增加后降低的

趋势,最大值出现在 10 kg/(hm² · a)N 水平。不同形态氮添加对土壤容重、持水量、和孔隙度的作用无显著差异(表 1)。

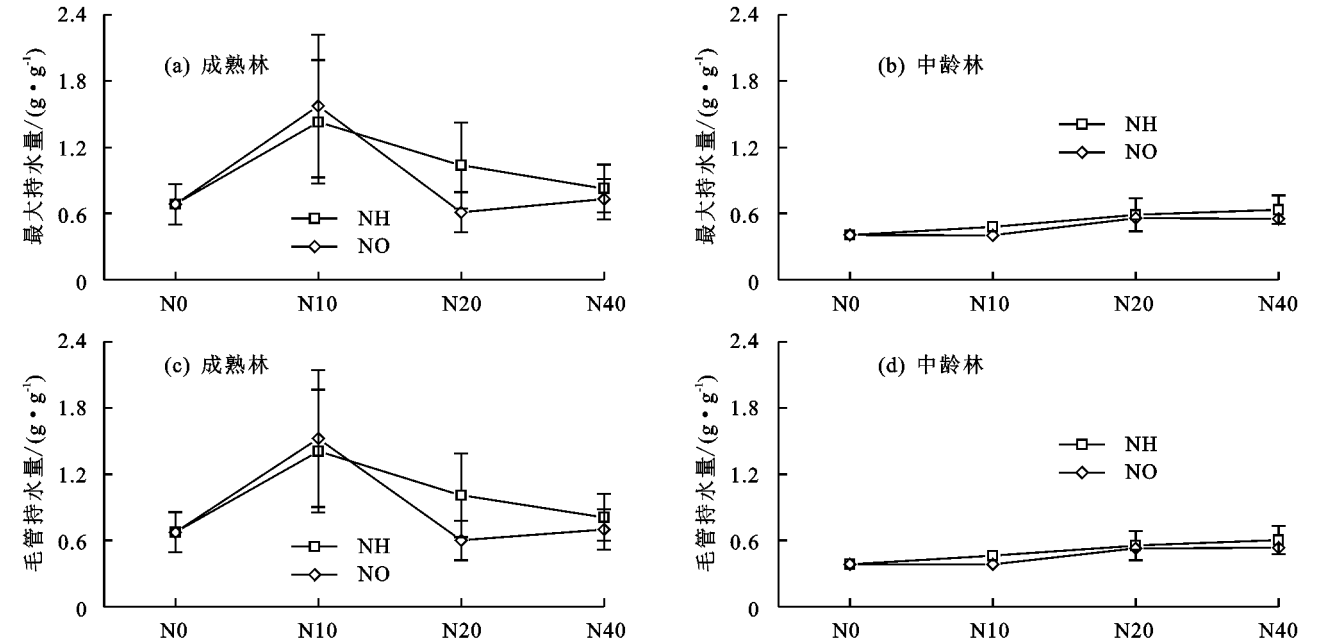


图 3 氮添加下成熟林与中龄林土壤持水量变化特征

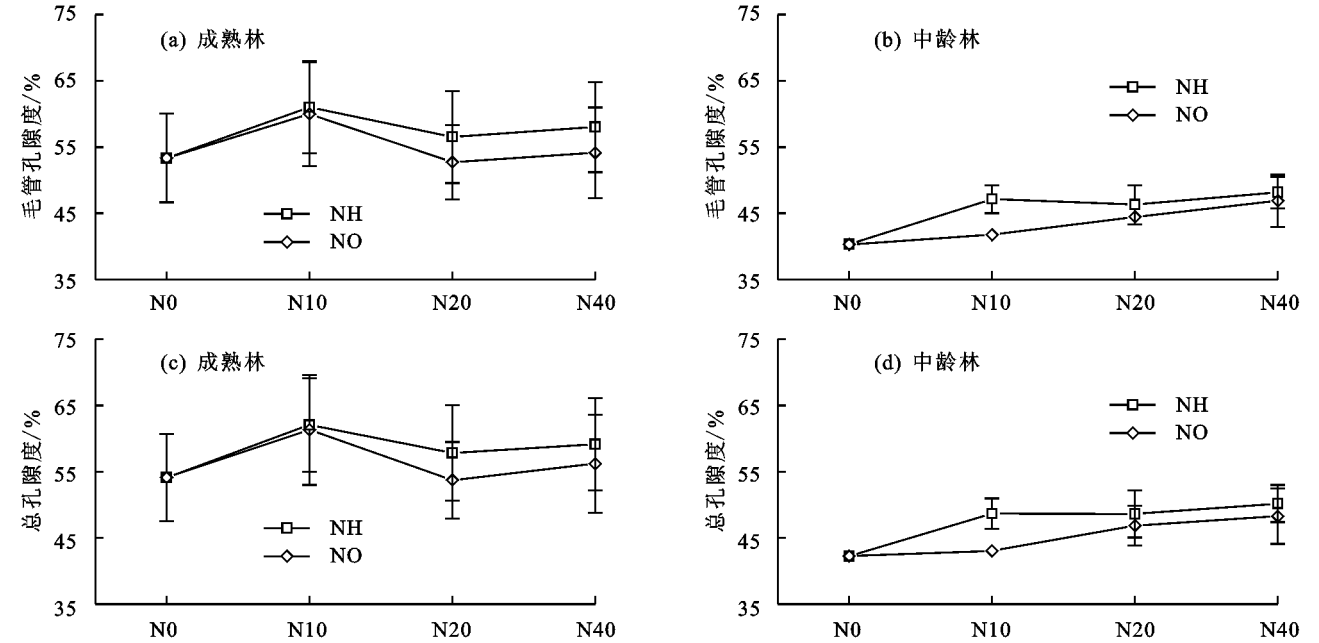


图 4 氮添加下成熟林与中龄林土壤孔隙度变化特征

2.3 氮添加对不同龄林土壤水分入渗性能的影响

不同龄林土壤水分入渗性能均呈现出初始入渗率>平均入渗率>稳定入渗率的一般规律,且表现出中龄林大于成熟林的趋势。中龄林土壤水分初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率分别是成熟林的 1.7, 1.9, 3.5 倍,显著高于成熟林(表 2)。随施氮量增加,中龄林土壤水分稳定入渗率逐渐增大,在 40 kg/(hm² · a)N 水平时达到最大;成熟林土壤水分稳定入渗率则表现出先增大后减小的趋势,最大值出现在 10 kg/(hm² · a)N 水平。不同形态氮添加对土壤水

分稳定入渗率的作用无显著差异(图 5)。

2.4 土壤水分入渗性能的影响因素

针叶林土壤水分初始入渗率与非毛管孔隙度显著正相关,与初始含水率显著负相关(图 6);平均入渗率与大粒径团聚体含量显著正相关,与小粒径团聚体、微团聚体含量、毛管持水量、初始含水率、毛管孔隙度和总孔隙度显著负相关;稳定入渗率分别与大粒径团聚体含量和中团聚体含量显著正相关,与最大持水量、毛管持水量、初始含水率、毛管孔隙度、总孔隙度、粉黏粒含量、小粒径团聚体含量和微团聚体含量显著负相关。

表 1 林龄和不同形态氮添加对亚高山针叶林土壤持水量、孔隙度及入渗率和团聚体结构影响的方差分析

影响因子	自由度	F 值						
		最大持水量	毛管持水量	毛管孔隙度	总孔隙度	稳定入渗率	>250 μm 团聚体含量	<250 μm 团聚体含量
林龄	1	5.18 *	5.57 *	8.87 **	7.32 *	27.5 ***	4.32 *	5.03 *
氮素形态	1	0.13	0.14	0.30	0.28	0.21	0.00	0.03
氮素水平	3	0.54	0.56	0.15	0.15	0.81	0.89	1.13
林龄×氮素形态	2	0.01	0.02	0.00	0.00	0.06	0.29	0.14
林龄×氮素水平	3	0.86	0.86	0.19	0.17	1.11	0.80	0.58
氮素形态×氮素水平	3	0.13	0.12	0.02	0.02	0.14	0.18	0.09
林龄×氮素形态×氮素水平	3	0.18	0.17	0.19	0.20	0.22	0.19	0.34

注：* 表示 $p<0.05$ ；** 表示 $p<0.01$ ；*** 表示 $p<0.001$ 。

主成分分析(表 3)表明,所有主成分中特征值>1的公共因子有 3 个,累计贡献率达到 94.19%,满足主成分分析条件,因此可以用这 3 个主成分解释上述影响因子对土壤入渗性能的影响。

从表 3 可以看出,第 1 主成分的方差贡献率达到 60.74%,负荷量绝对值>0.5 的影响因素按对值大小依次为初始含水率、毛管持水量、最大持水量、土壤

总孔隙度、毛管孔隙度、容重。第 2 主成分的方差贡献率为 22.20%,影响因素为大粒径团聚体含量和小粒径团聚体含量。第 3 主成分的方差贡献率为 11.26%,影响因素为非毛管孔隙度。主成分分析表明,施氮作用下,土壤持水能力、孔隙状况和团聚体结构是决定亚高山针叶林土壤水分入渗性能变化的主要因子。

表 2 不同氮肥类型对针叶林土壤入渗性能的影响

林龄	氮肥类型	初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)	达到稳渗 时长/min
成熟林	CK	11.48±4.86	4.35±1.57	1.61±0.51B	78.33±9.36
	(NH ₄) ₂ SO ₄	7.02±2.31	3.65±1.59	2.32±1.30B	85.56±11.30
	KNO ₃	8.04±3.69	2.55±0.91	0.94±0.33B	77.65±9.37
中龄林	CK	15.05±2.45	8.46±1.73	5.67±1.82A	72.50±7.22
	(NH ₄) ₂ SO ₄	39.83±8.03	16.69±3.08	7.00±1.58A	84.41±8.01
	KNO ₃	28.28±7.39	14.76±4.08	7.08±1.84A	93.06±7.23

注：表中数据为平均值±标准误差；同列不同大写字母表示林龄间差异显著($p<0.05$)。

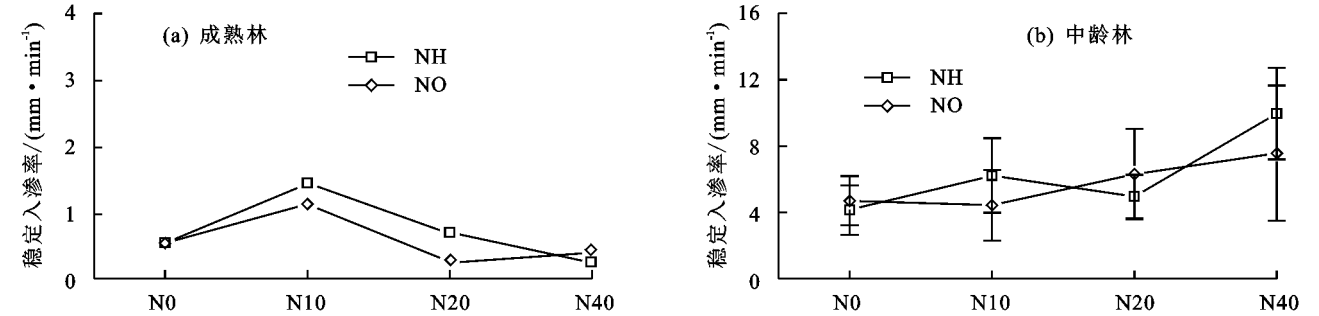


图 5 氮添加下成熟林与中龄林土壤稳定入渗率变化特征

3 讨论

3.1 大气氮沉降增加对土壤团聚体结构的影响

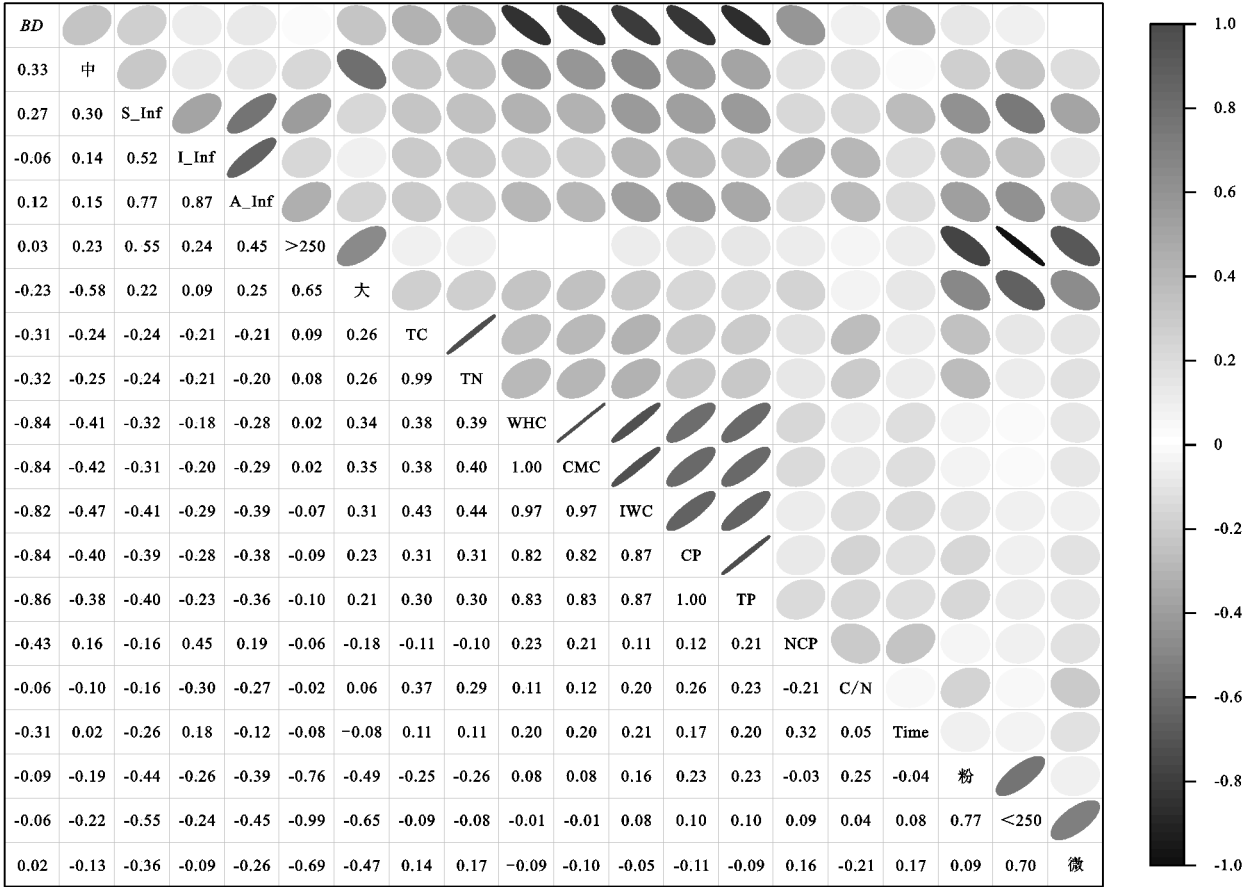
土壤大粒径团聚体(>250 μm)是反映土壤结构的主要指标。一般来说,成熟林土壤有机质含量高于中龄林,而有机质是团聚体形成的重要胶结物质^[3]。然而,土壤团聚体结构的变化,是有机质含量和植物根等多重因素共同作用的结果^[16],增大不同龄林土壤团聚体分布不规则的可能性。相比成熟林,施氮作用下中龄林土壤团聚体结构具有从小粒径团聚体向

大粒径团聚体聚集的趋势。这与黄晓强等^[16]关于侧柏人工林土壤团聚体的研究结果相类似。本研究,中龄林树木处于快速生长阶段,死亡根系较少,新生根系缠绕、黏结小颗粒物质能力强,因此外源氮添加促进中龄林大粒径团聚体的形成。

由于大多数陆地生态系统是受氮限制的,适当程度的氮输入通常刺激植物生长,但长期的高水平氮添加可能抑制根系和微生物的活性^[6],间接影响土壤颗粒的聚集。一方面过量氮肥输入导致土壤酸化和土壤中基础

阳离子(即 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 的损失,减少有机矿物复合物形成而抑制土壤团聚体形成^[17];另一方面,由长期的氮输入和相关阳离子的溶解和浸出引起的土壤酸化,往往限制微生物活性、胞外聚合物质的分泌和真菌的生长,

从而进一步抑制土壤的团聚过程^[18]。因此,施氮处理在 $10\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ N 水平时增加成熟林土壤大粒径团聚体含量,施氮水平继续升高则抑制土壤中大粒径团聚体的含量,降低土壤团聚结构的稳定性。



注:BD 为容重;S_inf 为稳定入渗率;I_inf 为初始入渗率;A_inf 为平均入渗率;Time 为达到稳渗时长;WHC 为最大持水量;CMC 为毛管持水量;IWC 为初始含水率;CP 为毛管孔隙度;TP 为总孔隙度;NCP 为非毛管孔隙度;大、中、微、粉分别为>2 000,2 000~250,250~53,<53 μm 团聚体含量;>250 为>250 μm 团聚体含量;<250 为<250 μm 团聚体含量;TC 为总碳;TN 为全氮;C/N 为总碳/全氮。

图 6 针叶林入渗率与各因子之间的 Pearson 相关分析

表 3 因子载荷阵及方差贡献率

因子	主成分 1	主成分 2	主成分 3
初始含水率	0.961	0.019	-0.172
毛管持水量	0.958	0.106	-0.059
最大持水量	0.957	0.105	-0.032
土壤总孔隙度	0.945	-0.029	-0.063
毛管孔隙度	0.934	-0.020	-0.153
容重	-0.922	-0.021	-0.212
>250 μm 团聚体含量	-0.077	0.991	0.059
<250 μm 团聚体含量	0.091	-0.991	-0.037
非毛管孔隙度	0.282	-0.097	0.949
贡献率/%	60.740	22.200	11.260
累计贡献率/%	60.740	82.930	94.190

Bai 等^[18]通过对全球范围内 87 个施氮控制试验结果的综合分析得到,无机氮形式的氮输入(NH_4^+ 、 NO_3^-)对土壤团聚体结构并没有显著影响,与本研究结果相一致。这是因为尽管 NO_3^- 的流动性比

NH_4^+ 强,却很容易被浸出,植物根系对其利用效率相对较低,从而影响土壤团聚过程,而 NH_4^+ 在被微生物硝化生成 NO_3^- 的过程中同时生成 H^+ ,导致土壤酸化^[6],这可能会对植物及土壤微生物产生毒害作用,进而影响土壤团聚体结构。考虑到 2 种类型氮肥都同时具备促进和不利于土壤团聚的特点,施用不同氮肥未对土壤团聚体的组成产生差异效应。

3.2 大气氮沉降增加对土壤持水能力和孔隙状况的影响

土壤持水能力是评价森林蓄水能力的重要指标,主要受到土壤容重、土壤孔隙度、土壤粒径组成、土壤结构和实际表面积等综合因素的影响^[19]。土壤孔隙状况作为重要的土壤结构特性之一,是影响水分运动和保持的重要物理属性,直接影响土壤的入渗性能^[20],其分类和评价常用总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度作为指标。容重和孔隙度是反映土壤物理性质的重要参数,本

研究中容重与最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度、总孔隙度呈显著负相关(图 6)。

随着林龄的增长,成熟林土壤的容重、持水能力和孔隙度等明显大于中龄林,这与冯秋红等^[21]对川西云杉不同林龄人工林林地土壤水文特征的研究结果基本一致。主要是因为随着林龄增加,林下生物多样性、灌木盖度、苔藓生物量等持续增长,对土壤容重、持水能力和孔隙度等物理性质有很强的改善作用。同时,成熟林林下凋落物较丰富,通过分解和腐殖化作用促进土壤有机质的积累,减小土壤容重,改善孔隙结构。成熟林根系发达,根系之间相互连生,其庞大的根系的穿插、伸展形成各种孔隙,以及活根的分泌物和死根系的腐败分解也增加土壤有机质含量和产生大量孔隙,从而增强土壤持水能力^[22]。

中龄林土壤持水能力和孔隙度等对氮添加的响应强于成熟林。相比成熟林,未成熟林生长对养分的需求很高,对外部氮输入的依赖性也很高,对外部氮输入的高度依赖可能加剧营养物质的限制^[23],对氮输入的响应也更为强烈。Vadeboncoeur^[24]进行的一项荟萃分析也表明,随着林分年龄的增加,森林对氮添加的响应有所下降。因此氮添加显著刺激中龄林植物生长,促进地上和地下生物量^[17-18]如凋落物、根系等增加,植被的根系在土壤中生长延伸、生死更迭,形成大量的根系和孔隙;植被为动物和微生物提供生存条件,它们的生息繁衍也在土壤中留下大量的孔洞和孔隙;生物体的腐烂分解在增加土壤有机质、改善土壤团粒结构的同时,也增加土壤孔隙,从而提高中龄林土壤的持水能力^[25]。此外,有研究^[2]表明,森林生态系统对不同浓度施氮水平的响应是非线性的,且存在氮沉降临界负荷。本研究中成熟林土壤持水量和孔隙度在 $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})\text{N}$ 水平时达到最大值,因此成熟林缺氮的阈值,即氮沉降临界负荷为 $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})\text{N}$ 。

3.3 大气氮沉降增加对土壤水分入渗性能的影响

土壤水分入渗通常经历 3 个阶段,即渗润阶段、渗漏阶段和渗透阶段,在这 3 个阶段水分受到不同力的作用^[3]。其中,在渗润阶段,水分在土壤中主要受分子力的作用,被土壤颗粒吸附进而在颗粒表面形成薄膜水,使得初始含水量低的土壤在该阶段的入渗速率(初始入渗率)高于初始含水量高的土壤。本研究中成熟林土壤的初始含水率显著大于中龄林,因此中龄林土壤水分初始入渗率明显大于成熟林。同时,在渗润阶段土壤入渗速率明显高于其他阶段,即衡量入渗性能的 3 个指标中,初始入渗率最大。在渗漏阶段,水分主要受重力和毛管吸力的作用在土壤孔隙中

移动,并开始填充孔隙,直至孔隙充满水,在这个阶段土壤入渗速率逐渐下降。在渗透阶段,水分已填满孔隙,在重力的作用下继续下渗,即非毛管孔隙度大的土壤,在该阶段土壤入渗速率大,渗透阶段入渗速率基本维持稳定。本研究中成熟林土壤的非毛管孔隙度显著小于中龄林,因此中龄林土壤水分稳定入渗率明显大于成熟林。

林下土壤水分入渗性能同时受林龄与树木密度的影响。前人^[26]研究表明,土壤水分入渗性能在同一林龄条件下,随密度的增加而增大;在同一密度条件下,随林龄的增加而增大。本研究中,中龄林样地的树木密度大于成熟林,这可能是导致中龄林土壤水分平均入渗率大于成熟林的原因。另外,王鑫皓等^[27]在研究根系构型对土壤入渗性能的影响中发现,水平根对土壤的入渗速率起抑制作用,水平根数量越多入渗速率越小,这或许也是中龄林入渗性能优于成熟林的原因之一,相关证据有待后续试验进一步补充。

相关分析结果表明,针叶林土壤水分稳定入渗率主要与大粒径团聚体含量、土壤总孔隙度、土壤持水量等显著相关;由主成分分析可知,土壤持水能力、孔隙状况、团聚体结构等是影响土壤入渗性能的主要因子,该结果与前人的研究一致。何苗苗等^[28]研究发现,土壤入渗的主要影响因子为水稳性团聚体稳定性、容重、非毛管孔隙度等;张玉琪等^[3]在研究祁连山东段不同退化程度高寒草甸土壤水分入渗率、机械组成和团聚体的变化时发现,水分入渗率与孔隙度、大粒径团聚体含量之间具有显著正相关性,大粒径团聚体含量减少导致土壤孔隙度下降,土壤的水分入渗能力逐渐降低,水源涵养能力变差。因此,土壤持水量、孔隙度及大粒径团聚体含量对氮添加的响应状况决定不同龄林土壤水分稳定入渗率随施氮量增加的变化特征,即随着施氮量增加,中龄林土壤水分稳定入渗率增大,成熟林土壤水分稳定入渗率先增大后减小。

4 结论

川西亚高山针叶成熟林土壤持水性能和孔隙状况优于中龄林;中龄林土壤大粒径团聚体含量高于成熟林,且土壤团聚结构稳定性和土壤水分入渗性能强于成熟林。外源氮添加增加中龄林土壤持水量和孔隙度,改善中龄林土壤团聚结构和水分入渗性能,但不同形态氮肥的作用无显著差异;成熟林中随施氮量增加,土壤持水量、孔隙度、大粒径团聚体含量和稳定入渗率呈先增加后降低趋势,最大值出现在 $10 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})\text{N}$ 水平。土壤持水能力、孔隙状况和团聚体结构等因素共同影响土壤水分入渗性能。

参考文献:

[1] 余新晓,赵玉涛,张志强,等.长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J].应用生态学报,2003,14(1): 15-19.

[2] 曹子铖,程淑兰,方华军,等.温带针阔叶林土壤有机碳动态和微生物群落结构对有机氮添加的响应特征[J].土壤学报,2020,57(4):963-974.

[3] 张玉琪,梁婷,张德罡,等.祁连山东段退化高寒草甸土壤水分入渗的变化及团聚体对水分入渗的影响[J].草地学报,2020,28(2):500-508.

[4] 李云,王全九,周蓓蓓.团聚体对黄土区土壤水分入渗过程的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(6):58-61.

[5] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J].Science,2008,320(5878):889-892.

[6] Tian D, Du E Z, Jiang L, et al. Responses of forest ecosystems to increasing N deposition in China: A critical review[J].Environmental Pollution,2018,243:75-86.

[7] Chang R Y, Li N, Sun X Y, et al. Nitrogen addition reduces dissolved organic carbon leaching in a montane forest[J].Soil Biology and Biochemistry,2018,127:31-38.

[8] Galdo I, Six J, Peressotti A, et al. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fraction and stable C isotopes[J].Global Change Biology,2003,9(8): 1204-1213.

[9] Lu X F, Hou E Q, Guo J Y, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis[J].Global Change Biology,2021,27(12):2780-2792.

[10] 孙向阳,王根绪,吴勇,等.川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应[J].生态学报,2013,33(2):501-508.

[11] Song L, Kuang F H, Skiba U, et al. Bulk deposition of organic and inorganic nitrogen in southwest China from 2008 to 2013[J].Environmental Pollution,2017, 227:157-166.

[12] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J].Nature,2013,494(7438): 459-462.

[13] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:511-526.

[14] 蒋德明,李小梅,丁扬.巨桉人工林下土壤团聚体对水分入渗的影响[J].贵州农业科学,2015,43(7):83-87.

[15] 田杰.黑河上游不同植被类型剖面土壤水文特征分析[D].兰州:兰州大学,2019.

[16] 黄晓强,信忠保,赵云杰,等.北京山区典型人工林土壤团聚体组成及其有机碳分布特征[J].水土保持学报, 2016,30(1):236-243.

[17] Schulte-uebbing L, de Vries W. Global-scale impacts of nitrogen deposition on tree carbon sequestration in tropical, temperate, and boreal forests: A meta-analysis[J].Global Change Biology,2018,24(2):416-431.

[18] Bai T S, Wang P, Ye C L, et al. Form of nitrogen input dominates N effects on root growth and soil aggregation: A meta-analysis[J].Soil Biology and Biochemistry,2021,157:e108251.

[19] 杨晓霞,赵锦梅,张雪,等.祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究[J].干旱区地理,2022, 45(1):197-207.

[20] 简永旗,吴家森,盛卫星,等.间伐和林分类型对森林凋落物储量和土壤持水性能的影响[J].浙江农林大学学报,2021,38(2):320-328.

[21] 冯秋红,王毅,刘兴良,等.川西亚高山不同林龄云杉人工林林地水源涵养能力比较研究[J].四川林业科技, 2020,41(1):5-10.

[22] 张日施,黄光友,南雅薇,等.桂西北不同年龄阶段秃杉人工林的水源涵养功能[J].水土保持学报,2021,35(5):130-136,143.

[23] Sun Z Z, Liu L L, Peng S S, et al. Age-related modulation of the nitrogen resorption efficiency response to growth requirements and soil nitrogen availability in a temperate pine plantation[J].Ecosystems,2016,19(4):698-709.

[24] Vadeboncoeur M A. Meta-analysis of fertilization experiments indicates multiple limiting nutrients in northeastern deciduous forests[J].Canadian Journal of Forest Research,2010,40(9):1766-1780.

[25] 戴全厚,喻理飞,薛蕊,等.植被控制水土流失机理及功能研究[J].水土保持研究,2008,15(2):32-35,61.

[26] 崔艳红,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析[J].北京林业大学学报,2021,43(1):77-87.

[27] 王鑫皓,王云琦,马超,等.根系构型对土壤渗透性能的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(4):73-82.

[28] 何苗苗,刘芝芹,王克勤,等.滇池流域不同植被覆盖土壤的入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2022, 36(3):181-187.