

黄土丘陵区不同坡向土壤水溶性 有机物特征及其根际效应

翟珈莹^{1,2}, 李袁泽³, 宋亚辉^{1,2}, 乔磊磊⁴, 辛奇⁴, 薛蕙^{1,4}

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为研究不同坡向对土壤水溶性有机物影响及其根际效应,选取黄土丘陵区不同坡向(阳坡、半阳坡、阴坡)的根际土和非根际土壤为研究对象,分析了水溶性总氮(WSN)、水溶性铵态氮($WSNH_4^+-N$)和硝态氮($WSNO_3^- -N$)、水溶性有机氮(WSON)、水溶性有机碳(WSOC)的含量及其水溶性有机物(DOM)并进行了紫外-可见光光谱分析。结果表明:(1)土壤的水溶性碳、氮养分均会受到坡向的影响,其中 $WSNH_4^+-N$ 的含量在阳坡达到最高,而 WSN, $WSNO_3^- -N$ 、WSON 以及 WSOC 的含量在半阳坡最高,并且养分含量尤其是 WSON 和 WSOC 的坡向分异会受到植物根际效应的影响产生变化。(2)根际土的水溶性氮组分和 WSOC 均会显著高于非根际土,不同物种的根际效应不同,且根际效应也会受到坡向的影响。(3)半阳坡土壤的 DOM 腐殖化水平最高,植物的根际效应也会显著提高土壤 DOM 的腐殖化程度,并且根际效应产生的作用远大于坡向的作用。

关键词:坡向; 根际; 非根际; 水溶性碳、氮

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0032-06

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.005

Comparative Analysis of Water Soluble Carbon and Nitrogen in Rhizosphere and Non Rhizosphere Soils of Different Slope Aspects in Loess Hilly Region

ZHAI Jiaying^{1,2}, LI Yuanze³, SONG Yahui^{1,2}, QIAO Leilei⁴, XIN Qi⁴, XUE Sha^{1,4}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the effect of different slope directions on soil water-soluble organic matter and its rhizosphere effect, the rhizosphere soil and non-rhizosphere soil of different slope directions (sunny slope, semi-sunny slope, shady slope) in loess hilly region were selected as research samples. The water soluble ammonium nitrogen ($WSNH_4^+-N$), nitrate nitrogen ($WSNO_3^- -N$), water soluble organic nitrogen (WSON) and water dissolved organic carbon (WSOC) the content of total nitrogen (WSN) were determined, and water soluble organic matter (DOM) was analyzed by ultraviolet visible spectrum. The Results show that: (1) the water soluble carbon and nitrogen of soil were all affected by slope direction; the content of $WSNH_4^+-N$ reached the highest in sunny slope, while the contents of WSN, $WSNO_3^- -N$, WSON and WSOC were the highest in semi-sunny slope, and the nutrient contents, especially the slope differentiation of WSON and WSOC, were affected by the rhizosphere effect; (2) the water-soluble nitrogen components and WSOC in rhizosphere soil were significantly higher than those in non-rhizosphere soil; the rhizosphere effects of different species were different and the rhizosphere effects were also affected by slope directions; (3) the level of DOM humification in semi-sunny slope soil was the highest, and the rhizosphere effect of plant could signifi-

收稿日期:2018-11-04

修回日期:2019-02-20

资助项目:十三五国家重点研发计划(2016YFC0501707);国家自然科学基金(41771557);中科院西部青年学者项目(XAB2015A05)

第一作者:翟珈莹(1996—),女,内蒙古赤峰人,硕士,研究方向为流域生态学。E-mail:825048035@qq.com

通信作者:薛蕙(1978—),男,陕西西安人,博士,研究员,博士生导师,主要从事土壤生态学研究。E-mail:xuesha100@163.com

cantly increase the degree of soil DOM humification, and the effect of rhizosphere effect was much greater than that of slope direction.

Keywords: slope direction; rhizosphere; non rhizosphere; water soluble carbon and nitrogen

土壤水溶性碳氮养分是植物可直接吸收利用的形态,直接影响着土壤对植物的养分供应能力^[1]。无机形态的水溶性铵态氮(WSNH_4^+-N 和硝态氮(WSNO_3^--N)是水溶性氮素的重要组成部分^[2],且因其具有溶解性和流动性的特点,故易参与土壤化学循环,对植物生长具有重要作用,而水溶性有机碳(WSOC)和水溶性有机氮(WSON)等所组成的水溶性有机物(DOM)化学性质活跃^[3],是土壤重要的养分库,也是土壤中最主要的可利用有机质组分,常被作为评价土壤肥力及质量的重要指标^[4]。

土壤的养分状况受到诸多因素的影响,坡向作为重要的地形因子对土壤的影响尤为明显。岳明^[5]认为坡向的变化就是光照、水分和养分的生态序列,地形因子通过其他一些因子作用于植物和土壤,从而对土壤养分状况产生影响。黄土丘陵区虽整体属同一气候区,但山体不同方向上的微气候却存在不同^[6],这种坡向分异通过改变光照、温度、水分等生态因子^[7]的同时也改变土壤生物化学过程,从而有可能作用于土壤养分,对土壤生态系统功能和植物生长等产生重要影响。目前研究主要集中在坡向对植物生长、微生物活动或者土壤水分特征的影响等方面,而关于坡向对土壤水溶性物质影响的研究却鲜见报道。此外,土壤作为植物生长发育的基质,为植物正常生长提供所需的养分和水分^[8],而植物反过来通过根系作用于土壤环境并对土壤养分产生一定的影响^[9]。目前关于植物的根际效应对土壤养分的影响是土壤学研究的重点之一,而不同坡向梯度上植物根际效应的差异也鲜见报道,因此,本研究以黄土丘陵区不同坡向草地群落的土壤为研究对象,分析坡向对土壤水溶性碳、氮的影响以及主要物种的根际效应,以期认识黄土丘陵区生态恢复过程的土壤质量保育和作用机理提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持综合试验站墩山(109°19'23"E,36°51'30"N),海拔1068~1309 m,年均气温8.8℃。年平均降雨量500 mm,年际变化大且年内分配不均,其中60%以上集中于7—9月,气候属于暖温带半湿润向半干旱过渡区,该区地形破碎,沟壑纵横,属黄土高原丘陵沟壑地貌,

土壤类型以黄土母质上发育而成的黄绵土为主,抗冲抗蚀能力差。目前研究区的优势草本主要为铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、芨芨草(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、披针苔草(*Carex lanceolata* Boott)等。

1.2 样地选取与样品采集

选取3个弃耕年限相同,立地条件相似但坡向不同的天然草地作为试验地,3个坡向分别为阳坡(S15°W)、半阳坡(N75°W)、阴坡(N57°E)。在每个坡向分别选取3个10 m×10 m样地,(基本信息见表1^[10]),每个样地间隔10 m以上,在每个样地选取3个1 m×1 m的小样方,在每个小样方内采用抖根法多株采集0—20 cm优势物种根际土,采用根钻法按照蛇形多点采集0—20 cm非根际土,每个样地的根际和非根际土壤样品分别混合,共采集土壤样品21个,将样品分成鲜样和风干样保存备用,其中风干样过1 mm和0.25 mm筛用于土壤理化性质测定,鲜样过2 mm筛用于土壤水溶性有机物组分的测定。

1.3 样品处理与测定

土壤理化性质采用常规测定方法^[11]。采用烘干法测定土壤含水率;土壤有机碳测定采用重铬酸钾氧化—外加热法;土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定;土壤全磷采用硫酸—高氯酸消煮—钼锑抗比色法测定;pH值测定用pH计(水:土=2.5:1);土壤速效磷测定采用碳酸氢钠提取钼锑抗比色法,土壤基本理化性质见表2^[10]。

土壤水溶性有机物组分采用改进的Ghani等^[12]的方法。称取相当于40 g干土重的新鲜土壤样品,加蒸馏水120 ml,25℃下振荡30 min后,高速离心(8000 r/min)10 min,用0.45 μm滤膜过滤上清液,所得浸提液冷冻保存用于测定土壤水溶性有机物组分和吸光值。其中水溶性有机碳(WSOC)用TOC分析仪测定;土壤水溶性总氮(WSN)的测定采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法,水溶性硝态氮(WSNO_3^--N)采用紫外比色法测定,水溶性铵态氮(WSNH_4^+-N)用连续流动分析仪进行测定,土壤水溶性有机氮(WSON)为水溶性总氮和硝态氮和铵态氮的差值 $\text{WSON} = \text{WSN} - (\text{WSNO}_3^--\text{N}) - (\text{WSNH}_4^+-\text{N})$ 。紫外可见光谱采用紫外分光光度计进行吸收波长扫描,扫描波长范围为220~665 nm,扫描间距为1 nm。

表 1 样地基本特征

坡向	植被群落类型	海拔/m	坡度/(°)	其他植被
阳坡 S15°W	白羊草—铁杆蒿	1263.02	33	糙影子草、野棉花、披针苔草
	白羊草—铁杆蒿	1263.02	33	兴安胡枝子、菊叶委陵菜、披针苔草、茭蒿、糙影子草、异叶败酱
	白羊草—铁杆蒿	1263.02	33	胡枝子、菊叶委陵菜、披针苔草
半阳坡 N57°E	铁杆蒿	1286.3	26	茵陈蒿、披针苔草、异叶败酱
	铁杆蒿	1286.1	26	香青兰、悬钩子、茜草、胡枝子、茵陈蒿、异叶败酱
	铁杆蒿	1286.3	26	异叶败酱、香青兰、鹅观草、茵陈蒿
阴坡 N75°W	铁杆蒿	1285.1	15	茭蒿、胡枝子
	铁杆蒿	1285.1	15	野豌豆、阿尔泰狗娃花、鹅观草、香青兰
	铁杆蒿	1285.2	15	芦苇、杂草

注:糙影子草(*Cleistogenes squarrosa*)、野棉花(*Anemone vitifolia*)、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)、异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)、香青兰(*Dracocephalum moldavica*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius* L.)、茜草(*Rubia cordifolia* L.)、鹅观草(*Roegneria kamoji* Ohwi)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、野豌豆(*Vicia sepium*)、芦苇(*Phragmites australis*)。

表 2 土壤的基本理化性质

坡向	根际/ 非根际	海拔/ m	坡度/ (°)	含水量/%	pH 值	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)
阳坡 S15°W	白羊草根际土	1263.02	33	10.33±0.01b	8.46±0.25a	7.95±0.48b	0.82±0.17b	0.45±0.00ab
	铁杆蒿根际土	1263.02	33	9.73±1.04b	8.64±0.04a	9.20±1.46a	0.97±0.05a	0.47±0.02a
	非根际土	1263.02	33	9.95±1.87b	8.62±0.05a	5.53±0.62c	0.68±0.04bc	0.43±0.03b
半阳坡 N57°E	铁杆蒿根际土	1286.30	26	11.39±0.80a	8.72±0.05a	7.36±0.24b	0.80±0.04b	0.48±0.01a
	非根际土	1286.30	26	10.01±0.40a	8.58±0.27a	4.90±0.27c	0.59±0.06cd	0.46±0.00ab
阴坡 N75°W	铁杆蒿根际土	1285.10	15	12.76±0.33a	8.63±0.21a	5.21±0.52c	0.57±0.02cd	0.47±0.01a
	非根际土	1285.10	15	12.31±2.27a	8.57±0.23a	4.28±0.27c	0.50±0.02d	0.46±0.03ab

注:同列不同字母表示不同处理间差异达显著水平($p < 0.05$);数值为均值±SD。

1.4 统计分析

数据采用 Microsoft Office Excel 进行处理,土壤 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值的计算公式是: $SUVA_{254} = 100 \times Abs_{254} / WSOC$,式中: Abs_{254} 是土壤水浸提溶液在 254 nm 处的吸光度,系数 100 是将 cm 换算为 m, $SUVA_{280}$ 用相同计算方法得到。使用 SPSS 20.0 进行单因素方差 (One-Way ANOVA) 分析和 LSD 多重比较检验,显著水平为 $p < 0.05$,采用 Excel 制作图表。

2 结果与分析

2.1 坡向对土壤水溶性组分及其光谱特征的影响

铁杆蒿根际土的 4 种水溶性氮组分在坡向上的分布规律各不相同(图 1A)。半阳坡的 WSN 含量显著高于阳坡和阴坡,而阳坡和阴坡则无显著差异,其含量变化规律表现为半阳坡>阳坡>阴坡; $WSNO_3^- - N$ 含量的变化趋势和 WSN 基本一致,但半阳坡仅显著高于阴坡,和阳坡之间的差异并不显著;3 种坡向的 $WSNH_4^+ - N$ 含量表现为阳坡>半阳坡>阴坡,其中阳坡的含量显著高于另外两种坡向,半阳坡和阴坡之间的差异不显著;而 WSON 含量在不同坡向上则

表现为另外一种变化,以阳坡的含量最低且显著低于另外两种坡向,半阳坡则略高于阴坡但并不显著。3 种不同坡向上的土壤 WSOC 含量(图 2A)呈现为阳坡>半阳坡>阴坡,且均为显著差异。

铁杆蒿非根际土的 4 种水溶性氮组分(图 1B)含量在不同坡向上的表现与根际土略有不同,但变化趋势类似。阴坡 WSN 含量最低且显著低于阳坡,半阳坡的 WSN 含量最高,但与阳坡差异不显著; $WSNO_3^- - N$ 在坡向上的分布规律与铁杆蒿根际土一致; $WSNH_4^+ - N$ 的含量表现为阳坡>半阳坡>阴坡,其中阳坡与阴坡的差异显著,其余均不显著;WSON 含量变化为半阳坡>阳坡>阴坡,其中半阳坡与阴坡差异显著,其余均不显著,WSOC 含量(图 3A)在不同坡度上的变化与 WSON 基本一致。

不同坡向的铁杆蒿根际土 DOM 紫外特征参数 $SUVA_{254}$ (图 3A) 的值基本接近,半阳坡微微略高于阳坡和阴坡,三者无显著差异;非根际土的 $SUVA_{254}$ 的值在半阳坡最高,阳坡最低且显著低于半阳坡,阴坡和其他二者差异均不显著;而根际土和非根际土的 $SUVA_{280}$ 都与 $SUVA_{254}$ 表现一致(图 3B)。

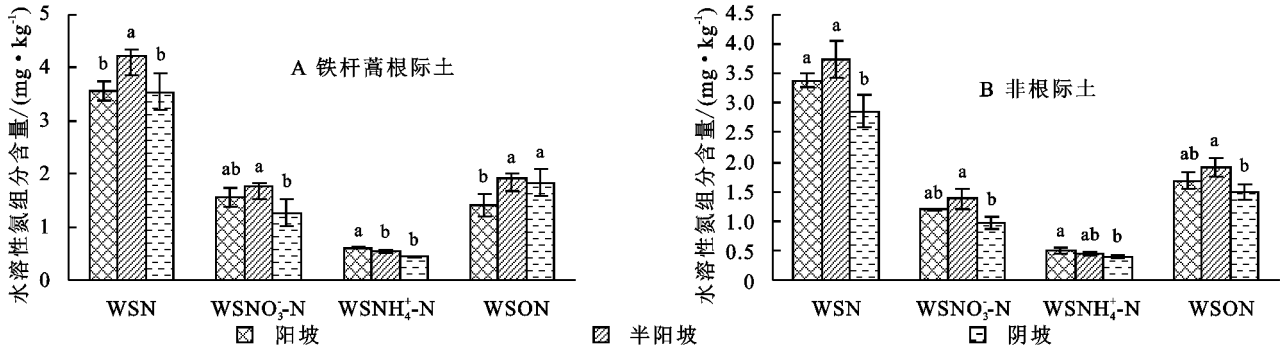


图 1 不同坡向土壤的水溶性氮组分

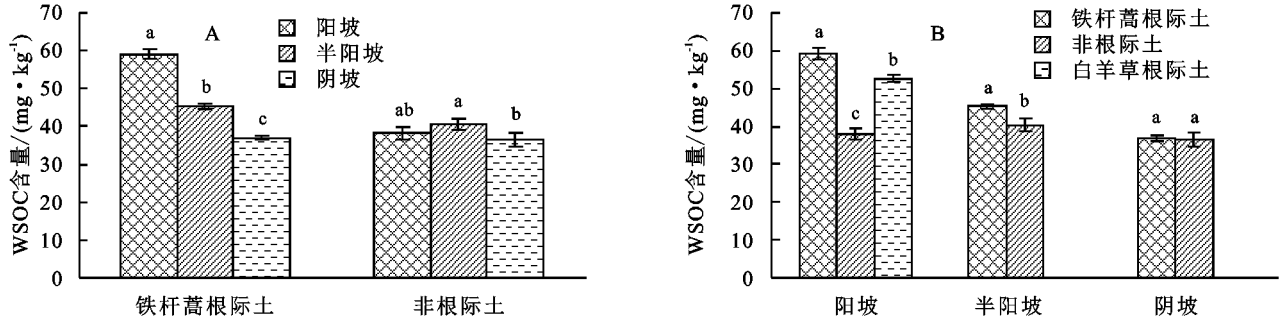


图 2 不同土壤的 WSOC 含量

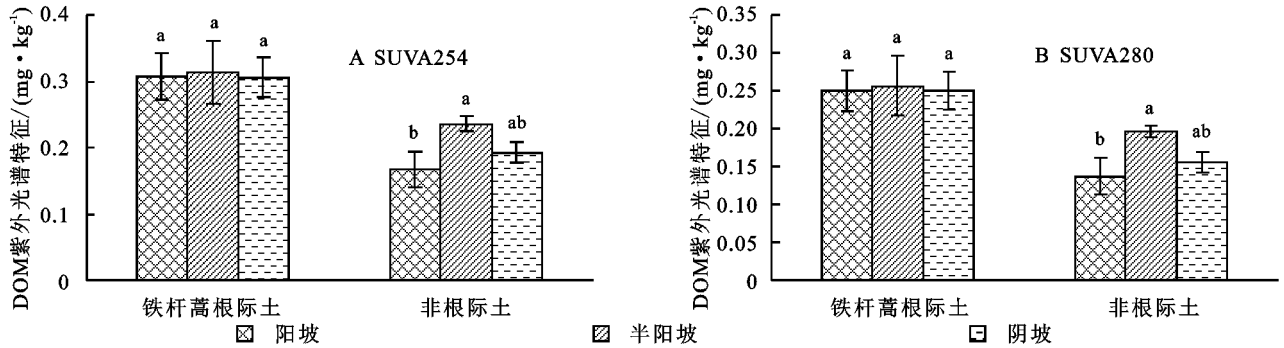


图 3 不同坡向土壤的 DOM 紫外光谱特征值

2.2 根际效应对水溶性组分及其光谱特征的影响

分别对 3 种坡向上的根际土和非根际土的水溶性组分进行对比,结果表明:阳坡(图 4A)上铁杆蒿根际土、非根际土的 WSN 含量并无显著差异,非根际土的 WSN 含量相比于铁杆蒿根际土低 5.24%;从 WSNO₃⁻-N 和 WSNH₄⁺-N 的含量来看,铁杆蒿根际土要高于非根际土 29.3%,21.7%,均达到显著水平;WSON 含量表现为非根际土高于铁杆蒿根际土,二者无显著差异;WSOC 含量(图 2B)表现为铁杆蒿根际土显著高于非根际土。

半阳坡(图 4B)铁杆蒿根际土的 WSN 的含量与非根际土也无显著差异,但比非根际土高了 12.76%;铁杆蒿根际土的 WSNO₃⁻-N 含量非根际土高了 28.34%,达到显著差异;铁杆蒿根际土 WSNH₄⁺-N 含量比非根际土略高 17.13%,二者无显著差异;WSON 的含量上二者极为接近,无显著差异,表现为铁杆蒿根际土的微微稍高于非根际土;WSOC 的含量(图 2B)表现为铁杆蒿根

际土显著高于非根际土。在阴坡时(图 4C),铁杆蒿根际土的 WSN 含量显著高于非根际土;铁杆蒿根际土的 WSNO₃⁻-N,WSNH₄⁺-N 和 WSON 含量都比非根际土高,但均无显著差异;二者的 WSOC 含量(图 3B)亦无显著差异。铁杆蒿根际土 DOM 的 SUVA₂₅₄(图 5A)和 SUVA₂₈₀(图 5B)值均显著高于非根际土,且 3 种坡向的表现规律基本一致。

2.3 不同物种对水溶性组分及其光谱特征的影响

阳坡上铁杆蒿根际土的 WSN 含量略高于白羊草根际土,但两者并无显著差异(图 4A);从 WSNO₃⁻-N 来看,同样是铁杆蒿根际土最高,两者差异不显著,而铁杆蒿根际土的 WSNH₄⁺-N 要显著高于白羊草根际土;二者的 WSON 差异不显著;WSOC 则表现为铁杆蒿根际土显著高于白羊草根际土(图 2B)。从 DOM 的紫外特征值 SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₈₀ 来看,铁杆蒿根际土高于白羊草根际土,但二者并无显著差异。

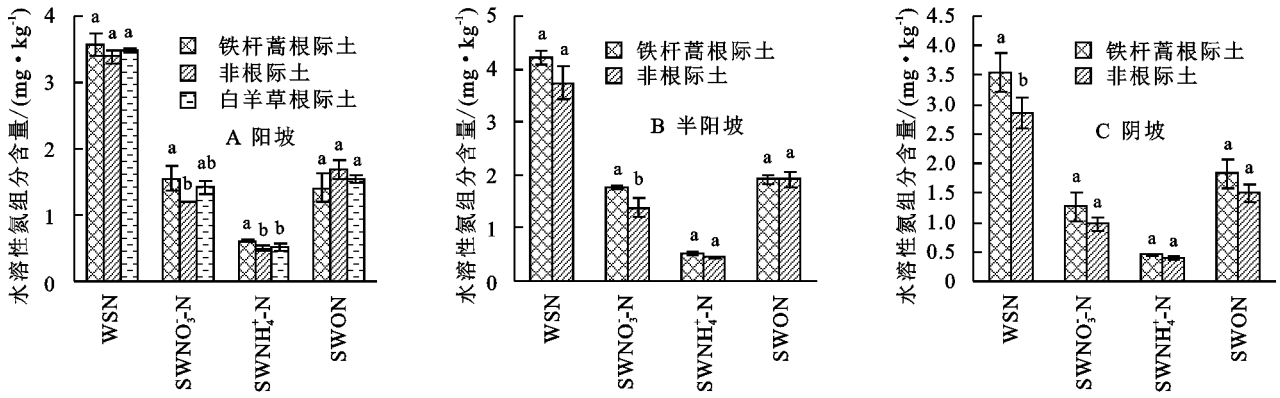


图 4 根际土与非根际土的水溶性氮组分

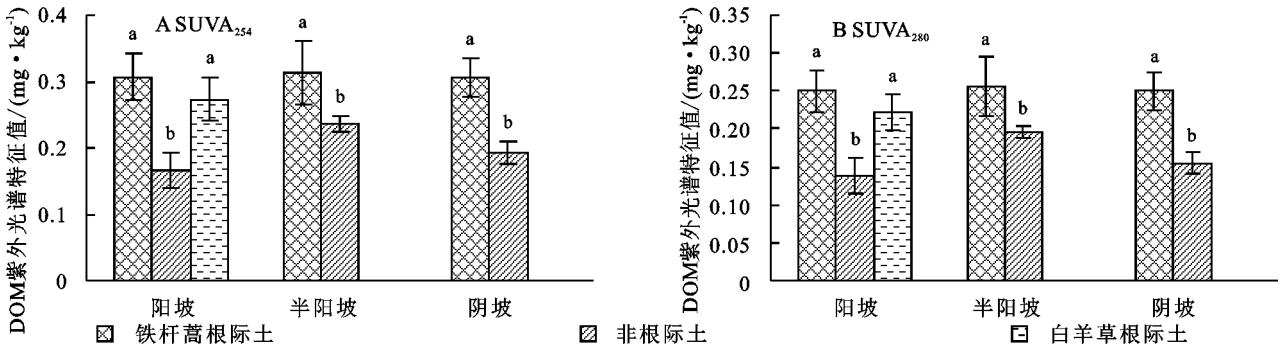


图 5 不同物种间的根际土以及非根际土的紫外光谱特征值的比较

3 讨论

过往大多研究认为阴坡土壤氮含量应该^[13-14]更高,且黄土坡面养分流失量随着坡度的增大而增大^[15],本研究中阳坡 33° > 半阳坡 26° > 阴坡 15°,但试验结果显示无论根际土还是非根际土壤的 WSN, WSNO₃⁻-N, WSON 均为半阳坡最高,根据之前 Ai 等^[16]在本样地上的研究,该样地的生物量由大到小的顺序为半阳坡、阳坡、阴坡,所以土壤水溶性氮元素含量之所以不符合坡度、坡向的影响规律,与坡面植被有很大关系,根据董兆佳等^[17]的研究,根际效应对土壤氮含量有着促进作用,故推测植物根际效应在该样地上是更明显的影响因素。而 WSNH₄⁺-N 表现在阳坡最高,推测是铵态氮本身属于土壤活性氮库中植物主要利用的有效氮形态^[18],且本身含量较低,对环境、植被变化都很敏感,故而不符合其他形态水溶性氮在该样地的分布规律。根际土的 WSON 表现为阴坡显著高于阳坡,阳坡的光照相对较强,因而温度高于阴坡,阴坡光照弱,土壤湿润肥沃,利于植物生长且对土壤微生物也有很大影响^[19],而非根际土的阳坡和阴坡之间 WSON 差异不显著,可见 4 种水溶性氮组分中 WSON 最易受到植物根系的影响。铁杆蒿根际土的 WSOC 坡向分异层次明显,而非根际土 WSOC 的这种坡向分异较为缓和,之所以呈现这样

的规律是由于样地 SOC 的差异所导致,根际土有机碳含量差异为阳坡大于半阳坡大于阴坡,均为显著差异,根际土 WSOC 含量变化规律符合这一规律。非根际土 SOC 差异均不显著,故坡向分异规律缓和。

白羊草和铁杆蒿两种不同植被的根际土壤的 WSNH₄⁺-N 含量有显著差异,而 WSN, WSNO₃⁻-N 和 WSON 没有表现出显著差异。同一坡向下根际土壤的水溶性氮组分和水溶性碳均高于非根际土,可见植物的根系对土壤水溶性碳氮的含量均有一定的促进作用,这与王震宇^[20]和陈高起^[21]等的结果一致,而并非所有坡向上根系都会对土壤水溶性碳氮产生十分明显的影响,这种促进作用的强度随着坡向的不同也在不断变化,这说明植物对土壤水溶性碳氮所产生的根际效应也会受到坡向不同程度的影响,这种影响的规律性还有待进一步的探讨。

水溶性有机物是土壤总有机物中活性高、变化最快的部分,对环境的变化反应迅速。水溶性有机物组成和结构在一定程度上可反映并决定土壤中的重要生态和生化过程^[22]。SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₈₀ 参数显示非根际土在半阳坡的土壤 DOM 腐殖化程度最高,而根际土的 DOM 腐殖化程度并没有在不同坡向上表现出显著差异,但其总体变化趋势和非根际土基本一致,因而推测根际土 DOM 的腐殖化程度无显著差异的原因是植物根系对其影响远远超过坡向对其影响。

由此可见, 水热条件适宜的半阳坡土壤腐殖化程度最高, 而在植物根系存在的条件下这种坡向对其产生的影响会变得及其微弱。

4 结论

(1) 土壤水溶性碳氮养分会受到坡向的影响, WSNH_4^+-N 在阳坡的含量达到最高, 但 WSN , WSNO_3^--N , WSO_4^{2-} 以及 WSOC 则在半阳坡表现的更为有利; 土壤水溶性碳氮的坡向分异会受到植物根际效应的影响, 且在 WSO_4^{2-} 和 WSOC 的含量变化上表现的尤为突出。

(2) 根际土的水溶性碳氮养分会显著高于非根际土, 不同物种的根系对土壤水溶性碳氮产生的根系效应也不相同, 并且这种根际效应的强度会因坡向不同而变化。

(3) 土壤 DOM 腐殖化程度会受到坡向的影响, 半阳坡土壤的 DOM 腐殖化水平最高, 而植物的根际效应也会显著提高土壤 DOM 的腐殖化程度, 且作用强度远大于坡向的影响, 在植物根系存在的条件下坡向所产生的影响会变得极其微弱。

参考文献:

- [1] 李寿田, 周健民, 王火焰, 等. 磷酸二氢钙和氯化钾对尿素处理的黄泥土水溶性铵态氮和硝态氮的影响[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(6): 1339-1344.
- [2] 谢秉楼, 吴家森, 徐秋芳, 等. 覆盖与施肥处理对雷竹林土壤水溶性有机氮的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1168-1171.
- [3] 常单娜, 曹卫东, 包兴国, 等. 西北灌漠土长期不同施肥改变土壤可溶性有机质的化学及光谱学特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 220-225.
- [4] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3): 211-235.
- [5] 岳明. 陕北南部侧柏生长与生态因子的关系[J]. 植物科学学报, 1998, 16(1): 47-53.
- [6] 蒲玉琳, 龙高飞, 刘世全, 等. 山地土壤坡向性分异的研究概况[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 753-757.
- [7] 沈泽昊, 张新时. 三峡大老岭地区森林植被的空间格局分析及其地形解释[J]. 植物学报: 英文版, 2000, 42(10): 1089-1095.
- [8] 董全民, 赵新全, 李青云, 等. 小嵩草高寒草甸的土壤养分因子及水分含量对牦牛放牧率的响应: II 冬季草场土壤营养因子及水分含量的变化[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 493-500.
- [9] Diaz S, Cabido M. Vive la difference: plant functional diversity matters to ecosystem processes[J]. *Trends in Ecology & Evolution* 2001, 16(11): 646-655.
- [10] 杨婷. 坡向对土壤微生物特征与生态化学计量特征的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [12] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [13] 刘旻霞, 王刚, 盛红梅. 高寒草甸阳坡—阴坡梯度上环境因子特征及其与地上生物量和物种丰富度的关系[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(1): 1-3.
- [14] 刘旻霞, 王刚. 高山草甸坡向梯度上植物群落与土壤中的 N, P 化学计量学特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2012, 48(3): 70-75.
- [15] 孔刚, 王全九, 樊军. 坡度对黄土坡面养分流失的影响试验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 14-18.
- [16] Ai Z, He L, Qi X, et al. Slope aspect affects the non-structural carbohydrates and C : N : P stoichiometry of *Artemisia sacrorum* on the Loess Plateau in China [J]. *Catena*, 2017, 152: 9-17.
- [17] 董兆佳, 孟磊. 海南蕉园根际与非根际土壤氮素含量特征[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 309-312.
- [18] 廖圣祥, 任运涛, 袁晓波, 等. 围封对黄土高原草地土壤铵态氮和硝态氮的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(6): 1044-1053.
- [19] 王素英, 王海荣, 方亮, 等. 大青山不同立地条件林木根际土壤微生物数量变化研究[J]. 内蒙古林业科技, 2009, 35(3): 18-24.
- [20] 王震宇, 赵芳芳, 张保国, 等. 黄河三角洲湿地盐生植物氮和磷的根际效应[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 33-38.
- [21] 陈高起, 傅瓦利, 张婷, 等. 石灰土地区几种作物根际与非根际土壤养分特征对比研究: 以重庆市中梁山为例[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 104-109, 116.
- [22] 王玉涛, 石辉, 刘雄飞, 等. 黄土丘陵区不同植被下土壤可溶性有机物的荧光特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 171-179.