

长期施用氮磷肥对塿土钾素的影响

王蕊¹, 王百群^{1,2,3}, 王昊¹, 张燕¹

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100;

2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨陵 712100; 3. 中国科学院 水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要:以长期定位施肥与小麦—玉米轮作田间试验为平台,研究了施肥对塿土土壤钾素的影响以及冬小麦生育期内塿土土壤速效钾、缓效钾及微生物量钾的变化。结果表明:氮磷肥不同施用量对土壤全钾基本没影响,而对速效钾、缓效钾及微生物量钾的影响较大。土壤速效钾和缓效钾均随施肥量的增加而减少,而微生物量钾随施肥量的增加而增加,且0—20 cm土层土壤速效钾、缓效钾及微生物量钾含量均高于20—40 cm土层。小麦生育期内,土壤速效钾和微生物量钾含量的变化一致,均是先上升再下降,再上升,又下降的变化。土壤中微生物量钾与有机碳、全氮均呈显著正相关关系,而与土壤速效钾和缓效钾无显著相关关系。氮磷肥在一定施用量范围内,促进了土壤无机态钾素的消耗,而提高了土壤微生物量钾的含量。土壤钾素的这种变化是作物吸收、施肥等因素共同作用的结果。

关键词:土壤钾素; 微生物量钾; 长期施肥; 塿土

中图分类号: S153.6⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0053-06

Effects of Long-term Application of Nitrogen and Phosphorus Fertilizers on Potassium of Lu Soil

WANG Rui¹, WANG Baiqun^{1,2,3}, WANG Hao¹, ZHANG Yan¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the

Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on field experiment of the long-term fertilization with wheat-corn rotation, soil total potassium, available potassium, slowly available potassium, and microbial biomass potassium were investigated for examining the effects of fertilization on soil potassium and the changes of soil inorganic potassium and microbial biomass potassium during winter-wheat growth. The results showed that different application amounts of N and P had little effect on soil total K, but had significant effect on soil available potassium, slowly available potassium and microbial biomass K. Soil available potassium and slowly available potassium decreased with the increase of fertilizer amount, while microbial biomass K increased with the increase of fertilization amount, and soil available potassium, slowly available potassium and microbial biomass K in 0—20 cm soil layer were higher than those in 20—40 cm soil layer. The contents of soil available K and microbial biomass K in the wheat growth period showed a fluctuating trend. Soil microbial biomass K is significantly positively correlated with organic C and total N, but is not significantly correlated with available potassium and slowly available potassium. The application of N and P fertilizers within a certain range promoted the inorganic K depletion and increased the content of microbial biomass K in the soil, which is the result of crop absorption, fertilization, management and other environmental factors.

Keywords: soil potassium; microbial biomass potassium; long-term fertilization; Lu soil

关中地区是我国粮食的重要产区之一,小麦—玉米轮作是该区主要种植制度。土壤钾素是作物所需钾的主要来源。塿土土壤含钾量丰富,但由于近年来氮磷肥用量的增加和传统上钾肥投入的亏缺,以及农业生产力和高产作物品种的种植与复种指数的提高,使土壤中的钾素耗竭严重,钾素营养平衡出现亏缺^[1,2]。学者们已经对夏玉米—冬小麦生育期内的土壤速效钾、缓效钾含量的变化趋势及作物吸钾量等方面进行了研究。土壤微生物量钾是作为土壤钾库必不可少的一部分,长久以来一直被忽略,关于作物生育期内土壤微生物量钾的研究也未见报道,且因长期定位试验具有时间的长期性和气候代表性的特点,信息量丰富,结果可靠,在土壤肥力和施肥研究中具有重要的地位^[3]。因此,本文以长期施肥田间试验为对象,研究冬小麦生育期内土壤全钾、速效钾、缓效钾及微生物量钾的变化,以揭示不同施肥量对土壤钾素的影响,为塿土钾素管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验点位于陕西省杨陵示范区中国科学院水土保持研究所的田间试验区,处于北纬 34.28°,东经 109.07°,海拔 481 m,年均气温 12.9℃,年日照时数为 2 163 h,年均降水量 635 mm,无霜期 228 d,属于暖温带半湿润大陆性季风气候。供试土壤为典型塿土。

1.2 试验设计

长期施肥与轮作试验布设于 1997 年,设对照不施肥(N₁)、低量氮磷肥配施(N₂)和高量氮磷肥配施(N₃)3 个处理(表 1),施用的氮肥为尿素,含氮量为 46%;施用的磷肥为过磷酸钙,五氧化二磷的含量为 12%。各处理均不施钾肥与有机肥,每个处理重复 2 次,随机区组排列。试验小区长 4.3 m,宽 2.5 m,面积为 10.75 m²。作物种植制度为冬小麦—夏玉米轮作。冬小麦采用条播方式,在播种前,将设计施用的肥料均匀撒施于地表,然后翻入 0—20 cm 土层中;在夏玉米生长期,于玉米三叶期施用设计施肥量的三分之一,于玉米大喇叭口期追肥设计施肥期施肥量的三分之二,施肥方式为穴施。

表 1 不同处理施肥量 kg/hm²

处理	氮肥(尿素)	磷肥(过磷酸钙)
N ₁	0	0
N ₂	75	45
N ₃	150	90

1.3 土样采集

在小麦播种期(2015-10-09),越冬期(2015-12-

29),返青期(2016-03-03),孕穗期(2016-04-11),抽穗期(2016-05-11)和收获期(2016-06-11)不同生育时期,分别采集 0—20 cm 与 20—40 cm 土层的土样,在每个小区,用土钻随机多点采集远离植株的土样,将所取样品均匀混合,作为一个样品。田间采集的一部分新鲜土壤样品于 4℃下冷藏保存,用于测定土壤微生物量钾;其余部分土壤样品进行风干、研磨并过筛,用于测定土壤全钾、速效钾、缓效钾及有机碳、全氮。

1.4 测定方法

土壤微生物量钾的测定采用氯仿熏蒸培养浸提法^[4]。新鲜土样过 2 mm 筛,于 25℃,含水量约 17%条件下预培养 7 d 之后,使用无水氯仿熏蒸 24 h,采用 1 mol/L CH₃COONH₄ 溶液进行浸提,最后使用原子吸收光谱法测定其含量。土壤微生物量钾转换系数为 0.21。

土壤全钾采用 NaOH 熔融—原子吸收光谱法测定,土壤速效钾采用 1 mol/L 的 CH₃COONH₄ 提取—原子吸收光谱法测定,土壤缓效钾采用 1 mol/L HNO₃ 消煮—原子吸收光谱法测定,土壤有机碳采用重铬酸钾—外加热法,土壤全氮用半微量凯氏法测定^[5]。

2 结果与分析

2.1 施肥对小麦生育过程中土壤全钾的影响

土壤全钾是土壤中各种形态钾的总含量,其数值大小可相对反映土壤钾库容量和供钾潜力^[6]。根据统计分析结果,在冬小麦生育过程中,不同时期土壤全钾的差异不显著,因此本文将 6 个时期测定的数据进行平均处理得到表 2。从表 2 可以看出,土壤全钾含量为 20.42~21.21 g/kg。在相同施肥水平,0—20 cm 土层土壤全钾含量与 20—40 cm 土层含量基本相同;在相同土层,不同处理水平土壤全钾含量也基本相同,说明长期不施钾肥并不影响塿土钾素储量,进一步表明了塿土含钾丰富。

表 2 不同施肥处理土壤全钾含量 g/kg

土层深度/cm	处理		
	N ₁	N ₂	N ₃
0—20	20.61±0.09Aa	20.67±0.69Aa	20.43±0.28Aa
20—40	21.21±0.16Aa	20.67±0.16Aa	20.42±1.30Aa

注:表中数据为平均值±标准差;数据后同行不同小写字母及同列不同大写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

2.2 长期施肥对土壤速效钾和缓效钾的影响

施肥是影响土壤钾素的外源因素之一。由表 3 可以看出,0—20 cm 土层中土壤速效钾平均含量分别为 127.29 mg/kg,111.89 mg/kg 和 111.14 mg/kg,且冬小麦各生育时期土壤速效钾含量基本表现为:不施肥处理(N₁)与低量氮磷肥配施(N₂)、高量氮磷肥配施(N₃)间均

存在显著差异,而低量氮磷肥配施(N_2)与高量氮磷肥配施(N_3)之间无显著差异,但均表现出 $N_1 > N_2 > N_3$ 的趋势;20—40 cm 土层中土壤速效钾平均含量分别为 116.21 mg/kg, 108.92 mg/kg 和 105.30 mg/kg, 土壤施肥处理间差异不明显,但总体上也表现出 $N_1 > N_2 > N_3$ 。说明长期氮磷肥配施能显著影响矮土土壤速效钾含量。此外,0—20 cm 土层土壤速效钾含量高于 20—40 cm,说明了矮土土壤钾素分布规律是 0—20 cm 高于 20—40 cm。

耗竭试验研究表明,土壤缓效钾是作物可直接利用

的养分之一^[7],但却释放速度缓慢^[8]。从表 4 中可以发现,0—20 cm 土层土壤缓效钾平均含量分别为 1 018.65 mg/kg, 1 005.01 mg/kg 和 991.82 mg/kg, 冬小麦各生育时期土壤缓效钾含量基本表现为 $N_1 > N_2 > N_3$, 但处理间差异性不明显;20—40 cm 土层土壤缓效钾含量平均值分别为 998.02 mg/kg, 972.31 mg/kg 和 966.11 mg/kg, 表现为 $N_1 > N_2 > N_3$, 且处理间无显著差异。说明了长期氮磷肥配施并不能显著影响矮土土壤缓效钾含量。此外,不难发现,0—20 cm 土层土壤缓效钾含量基本高于 20—40 cm 土层土壤缓效钾。

表 3 土壤速效钾的动态变化

mg/kg

土层深度/cm	处理	土壤速效钾						平均
		10月	12月	3月	4月	5月	6月	
0—20	N_1	121.47±12.26Ab	168.07±7.46Aa	120.07±8.07Ab	116.94±2.91Ab	122.34±2.00Ab	114.85±0.67Ab	127.29±20.86Aa
	N_2	103.51±1.40Bc	150.88±6.49Ba	102.89±1.98Bc	101.27±9.16Bc	102.74±6.57Bc	110.03±0.71ABb	111.89±18.87Ba
	N_3	107.29±9.73Bb	144.71±3.12Ba	96.68±0.74Bb	102.67±8.31Bb	110.87±20.65Cb	104.60±5.29Bb	111.14±17.98Ba
20—40	N_1	104.87±3.42Ace	156.95±4.65Aa	100.75±0.54Ae	111.43±7.93Abd	110.26±0.77Abcd	112.97±5.61Ab	116.21±20.18Aa
	N_2	97.61±4.37Abc	154.44±2.43Aa	96.98±2.97Ac	101.68±10.49Bb	102.67±2.68Bb	100.14±6.64Bbc	108.92±21.78Aa
	N_3	93.60±3.11Bb	144.34±3.65Ba	93.53±3.15Ab	101.13±8.70Bb	100.14±1.88Bb	99.05±6.34Bb	105.30±18.87Ba

注:表中数据为平均值±标准差;数据后同行不同小写字母及同列不同大写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

表 4 土壤缓效钾的动态变化

mg/kg

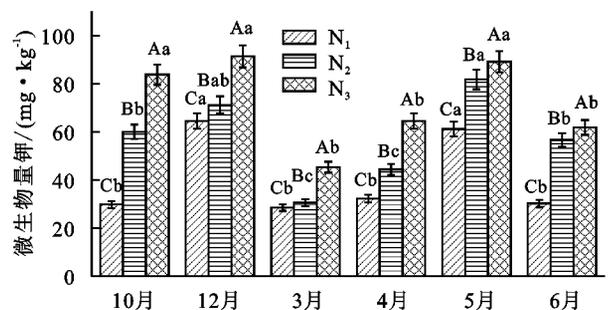
土层深度/cm	处理	土壤缓效钾						平均
		10月	12月	3月	4月	5月	6月	
0—20	N_1	1051.76±14.87Aac	1057.14±22.30Aa	993.62±5.61Bbd	985.04±38.38Ad	1048.89±1.57ABabc	975.53±39.17Ad	1018.65±33.80Aa
	N_2	997.90±98.77Ab	1062.59±14.12Aa	974.75±9.83Bb	958.07±78.86Ab	1090.13±97.87Aa	946.63±100.96Ab	1005.01±60.57Aa
	N_3	972.77±39.05Ba	969.61±44.02Bc	1053.8±8.44Aa	973.81±45.69Aa	1010.19±21.10Ba	970.83±88.86Ab	991.82±50.29Aa
20—40	N_1	949.01±112.64Aa	1032.05±92.55Aa	1055.52±44.39Aa	952.81±16.96Aa	1043.93±44.59Aa	954.82±53.69Aa	998.02±84.56Aa
	N_2	987.21±36.03Aa	945.72±16.43Ba	1027.36±29.77Aa	961.75±57.36Aa	981.14±19.21ABa	930.70±100.83Aa	972.31±42.71Aa
	N_3	934.68±1.43Aa	1008.61±218.81ABa	1026.48±35.05Aa	916.73±30.35Aa	959.50±30.74Ba	950.74±56.87Aa	966.11±108.25Aa

2.3 长期施肥对土壤微生物量钾的影响

长期施肥也能影响土壤生物学性质,以及相关土壤生态过程^[9]。从图 1 可以看出,0—20 cm 土层土壤微生物量钾的变化范围分别为 28.53~64.60 mg/kg, 30.55~80.82 mg/kg 和 45.34~91.37 mg/kg, 且均表现为 $N_3 > N_2 > N_1$, 且各处理间差异显著;从图 2 可以看出,20—40 cm 土层土壤微生物量钾的变化范围分别为 22.7~63.28 mg/kg, 36.99~75.53 mg/kg 和 42.33~80.87 mg/kg, 但仅在越冬期(10 月份)、孕穗期(5 月份)和收获期(6 月份)时表现为 $N_3 > N_2 > N_1$, 且处理间差异显著,而其他时期土壤微生物量钾含量则不同。可能原因是,土壤微生物生物量受环境条件的影响较大。

此外,从图 1,图 2 分析可知,0—20 cm 土层土壤微生物量钾平均含量分别为 41.10 mg/kg, 57.46 mg/kg, 72.69 mg/kg, 低量氮磷肥配施(N_2)和高量氮磷肥配施(N_3)较不施肥处理(N_1)分别增加了 39.82%, 76.88%;20—40 cm 土层土壤微生物量钾平均含量分别为 44.97 mg/kg, 50.63 mg/kg, 55.03

mg/kg, 而低量氮磷肥配施(N_2)和高量氮磷肥配施(N_3)较不施肥处理(N_1)仅分别增加了 12.57%, 22.35%。两者相比较,可以发现 0—20 cm 土层土壤微生物量钾含量相对较高,说明氮磷肥配施对 0—20 cm 的影响较大。



注:图中不同大写字母表示相同时期的不同处理间差异显著;不同小写字母表示同一处理水平的不同时期差异显著,下同。

图 1 0—20 cm 土层土壤微生物量钾

2.4 土壤速效钾、缓效钾及微生物量钾的动态变化

土壤速效钾、缓效钾及微生物量钾是植物生长所需要的钾库。土壤速效钾是植物可直接吸收利用的钾素给源。从表 3 可以看出,冬小麦的不同生育时期

土壤速效钾含量不同。速效钾含量在越冬期(12月份)达到最高,0—20 cm 土层各处理速效钾含量分别为 168.07 mg/kg,150 mg/kg,144.71 mg/kg,20—40 cm 土层各处理的含量分别为 156.95 mg/kg,154.44 mg/kg,144.34 mg/kg,且该时期速效钾含量与其他各时期土壤速效钾含量基本呈显著性差异。从整体上分析,冬小麦生育期内,土壤速效钾含量的波动基本呈现一定的规律性,具体表现为:升高—降低—升高—降低,但各个处理土壤速效钾含量最低时所在的时期稍有差异,这主要与冬小麦生育期的养分吸收特性有关。

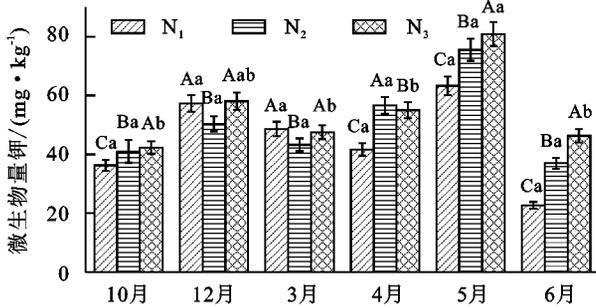


图2 20—40 cm 土层土壤微生物量钾

土壤中的缓效钾可以转化为速效钾,供给植物吸收。从表4可以看出,冬小麦各生育时期土壤缓效钾含量也不同。0—20 cm 土层缓效钾的最高含量分别为 1 057.14 mg/kg,1 090.13 mg/kg,1 053.80 mg/kg,但并未在同一时期,同时,该土层缓效钾含量最低时所在的时期也不相同;20—40 cm 土层土壤缓效钾含量均在返青期(3月份)时达到最高,分别为 1 055.52 mg/kg,1 027.36 mg/kg,1 026.48 mg/kg,同时,缓效钾含量基本在六月份时最低,但该土层各时期缓效钾含量差异性不明显。综上所述,冬小麦生育的不同时期,土壤缓效钾含量虽表现出不同,但土壤缓效钾变化不存在规律性。这主要与缓效钾在短时间内的释放速率有关。

由图1看出,在0—20 cm 土层中,各施肥处理土壤微生物量钾含量在返青期(3月份)时最低,分别为 28.53 mg/kg,30.55 mg/kg,45.34 mg/kg,但含量最高时所在的时期略有差别;20—40 cm 土层土壤微生物量钾含量均在抽穗期(5月份)时达到最高,分别为 63.28 mg/kg,75.53 mg/kg,80.87 mg/kg,但含量最低时所在的时期略有差别。然而从整体上看,冬小麦生育时期内,各施肥处理土壤微生物量钾表现出与土壤速效钾相似的变化规律,即升高—降低—升高—降低。

2.5 土壤速效钾、缓效钾、微生物量钾与土壤有机碳、全氮间相关关系

土壤微生物参与土壤养分的循环和转化,与土壤质量和肥力高低有着密切的关系^[10]。从表5的相关分析结果可知,土壤微生物量钾与速效钾、缓效钾均无相关关系,而与土壤有机碳、全氮均存在显著正相

关关系;其次,土壤速效钾和缓效钾含量与土壤有机碳、全氮含量均无明显相关关系。表明土壤有机碳及全氮显著影响土壤微生物量钾含量,而对土壤速效钾和缓效钾含量的影响较小。此外,对土壤速效钾、缓效钾含量与微生物量钾含量进行数据分析,结果发现速效钾是微生物量钾的 2.5~5.0 倍,土壤缓效钾是微生物量钾的 15~25 倍。

表5 土壤微生物量钾与土壤速效钾、缓效钾、有机碳、全氮相关性分析

指标	速效钾	缓效钾	微生物量钾	有机碳	全氮
速效钾	1				
缓效钾	0.189	1			
微生物量钾	0.475	0.450	1		
有机碳	0.129	0.341	0.648**	1	
全氮	0.351	0.303	0.716**	0.625**	1

注:数值为相关系数;*表示在0.01水平上显著相关;**表示在0.05水平上显著相关。

3 讨论

钾素是植物生长必须的三大营养元素之一,也是土壤中含量最高的大量营养元素。土壤中钾主要以无机状态存在,按其对应作物有效程度划分为速效钾(包括水溶性钾、交换性钾)、缓效钾和矿物态钾三种,它们之间存在着动态平衡,调节着钾对植物的供应。

氮磷肥配施对土壤全钾含量影响较小。主要原因在于本土本身含钾量丰富,全钾中约 95% 属于难以被作物利用的矿物态钾,这与葛玮健^[11]试验结果基本一致。与全钾不同,土壤速效钾和缓效钾易受施肥因素的影响。同一土层,相同时期不同处理土壤的速效钾、缓效钾的含量高低顺序均为: $N_1 > N_2 > N_3$,且0—20 cm 土层土壤的含量高于20—40 cm 土层的含量。说明氮磷肥配施能影响土壤速效钾和缓效钾的含量,且均随氮磷肥施用量的增多而减少,即土壤钾素的耗竭量越大,主要原因是氮磷肥施用量的增多,促进了冬小麦对氮、磷的吸收,受冬小麦自身生理因素的影响,也同时提高了作物对土壤钾素的吸收量,再者,冬小麦根系分布^[12]也会影响土壤钾素的高低。由表4可知,在0—20 cm 土层,小麦不同生育时期各处理间土壤缓效钾含量差异不显著,且在20—40 cm 土层土壤缓效钾含量也差异不显著,但仍存在 $N_1 > N_2 > N_3$,0—20 cm 土壤含量高于20—40 cm 土层的规律,这与在自然条件下,土壤缓效钾的释放受土壤矿物学性质、颗粒大小、干湿和冻融交替、植物根系以及土壤微生物活动的影响^[13]。

土壤微生物量钾作为土壤钾库重要的一部分,却一直被忽略^[4]。数据分析表明,不同处理间土壤微生物量钾的含量均随施肥量的增多而增加,且处理间的差异显

著;在相同处理水平的同一土层中,土壤中微生物量钾含量均表现为:0—20 cm 土层土壤微生物量钾含量高于20—40 cm 土层。主要原因在于:(1) 土壤微生物以异养型为主,其生命活动需要消耗一定的能量,而植物残体,植物根系等多集中于表土层,根系分泌物可以加剧微生物繁衍^[14]; (2) 长期施用化肥,尤其是氮肥,可以增加植物根茬等的残留,提高了根系生物量,增加土壤有机物的含量^[15],而0—20 cm 土层的土壤疏松,气体交换通畅,从而利于微生物分解有机物。

耗竭条件下土壤钾素的动态可以揭示不同生育时期土壤自身钾素的代谢规律,从而得到土壤钾素的变化规律。冬小麦不同生育时期内,土壤中速效钾和微生物量钾的变化均呈现出升—降—升—降的趋势,且在返青期(3月份)时含量最低,这与已报道的关于冬小麦生育期土壤速效钾的动态变化趋势基本一致^[16-17]。土壤速效钾和微生物量钾主要受冬小麦吸收的影响,其次也与土壤类型、施肥、种植制度、环境等诸多因素有关,各种因素之间可能存在互作效应。返青期之前,小麦吸钾量缓慢,土壤速效钾及微生物量钾含量较高;进入返青期(3月份)后,气温回升,土壤微生物活动开始增强,有机碳分解速度加快,冬小麦对土壤养分的需求量逐渐增多,迅速生长,土壤钾素消耗加快,又因3月份降雨量少,土壤含水量少,而水分能够影响土壤钾素释放量、钾素运移能力,并且严重制约微生物生长与繁殖,因而此时土壤速效钾、微生物量钾含量降低;之后,进入孕穗期(4月份),大气温度上升,降雨量增多,促进了土壤钾素的释放^[18],土壤供钾能力得到了提升,然而钾素的释放量及释放速率与土壤缓效钾有关。缓效钾是储存于易风化含钾矿物晶格中的钾和土壤固钾矿物所固定的钾,是速效钾的补给来源,其变化与速效钾含量、含钾矿物及黏粒组成有关^[19],在不施钾肥的情况下,土壤速效钾含量的变化主要受缓效钾的释放速率及释放量的控制^[20],但短时间内缓效钾的释放数量有限。而在此时期,冬小麦生长迅速,对养分的要求较高,因此,土壤钾素上升幅度不大;进入灌浆成熟期(6月份),冬小麦根系老化,吸钾能力减弱,细胞膜透性增大,出现钾素外排现象,此时作物需钾主要利用了体内其他衰老器官间钾素的相互转移,这时可能会出现土壤钾素回升现象,但此时温度较高,表层土壤水分损失严重,微生物数量下降,土壤微生物量钾含量降低,大气温度和降水已成为影响土壤微生物量钾的主导因素。

根据相关性分析的结果,土壤有机碳及全氮显著影响土壤微生物量钾含量。其主要原因可能是,土壤有机质和全氮含量影响土壤微生物量及微生物群落结构^[21],进而影响土壤中细菌/真菌的比例^[22-23],细菌和真菌体内含钾量不同,故而微生物量钾含量有所不同。总之,土壤有机碳对微生物量起关键作用,有机碳控制着土壤

中的能量和营养物质,有机碳越高,土壤微生物量就越大。然而,农田土壤微生物量是环境因素与人为因素共同作用的结果,本研究仅从土壤有机碳、全氮的角度分析土壤微生物量钾含量,仍需进一步从土壤微生物群落结构及微生物生物量等角度分析土壤微生物量钾,从而为农田钾素管理提供科学合理的建议。

4 结论

(1) 长期氮磷肥配施,不影响土壤全钾含量,而土壤速效钾、缓效钾及微生物量钾则受氮磷肥配施的影响。具体表现为:随氮磷肥施用量的增多,土壤速效钾和缓效钾含量均逐渐减少,且0—20 cm 土层土壤的速效钾和缓效钾含量均高于20—40 cm 土层的含量,但氮磷肥配施对土壤速效钾含量影响显著,而对土壤缓效钾影响不显著。

(2) 土壤微生物量钾含量为44.63~60.23 mg/kg,随施肥量增多而增加,且0—20 cm 土层的含量高于20—40 cm 的含量。

(3) 在冬小麦的生育期内,各时期土壤的速效钾和微生物量钾含量呈变化趋势一致,即升—降—升—降,即在越冬期(12月份)时含量最高,返青期(3月份)时最低。

(4) 土壤微生物量钾与土壤有机碳,全氮之间呈显著正相关关系,而与土壤速效钾,缓效钾之间不存在显著相关关系,表明了土壤微生物量钾含量与土壤有机碳和氮含量有关。

参考文献:

- [1] 黄绍文,金继运. 土壤钾形态及其植物有效性研究进展[J]. 土壤肥料,1995(5):23-29.
- [2] 王志勇,白由路,杨俐萍,等. 低土壤肥力下施钾和秸秆还田对作物产量及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(4):900-906.
- [3] 张会民. 长期施肥下我国典型农田土壤钾素演变特征及机理[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [4] Lorenz N, Verdell K, Ramsier C, et al. A rapid assay to estimate soil microbial biomass potassium in agricultural soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,74(2):512-516.
- [5] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业大学出版社,2013.
- [6] 师江澜,李秀双,王淑娟,等. 长期浅耕与秸秆还田对关中平原冬小麦—夏玉米轮作土壤钾素含量及层花比率的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(11):3322-3328.
- [7] 黄绍文,金继运,王泽良,等. 北方主要土壤钾素形态及其植物有效性研究[J]. 植物营养与肥料学报,1998,4(2):156-164.
- [8] 程明芳,金继运,黄绍文. 我国北方主要土壤非交换性钾释放速率的研究[J]. 土壤学报,1999,36(2):218-224.

- [9] 张瑞,张贵龙,陈冬青,等.不同施肥对农田土壤微生物功能多样性的影响[J].中国农学通报,2013,29(2):133-139.
- [10] 焦晓光,高崇升,隋跃宇,等.不同有机质含量农田土壤微生物生态特征[J].中国农业科学,2011,44(18):3759-3767.
- [11] 葛玮健.长期施肥对土壤钾素状况和钾素利用效率的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [12] 刘荣花,朱自玺,方文松,等.冬小麦根系分布规律[J].生态学杂志,2008,27(11):2024-2027.
- [13] 金继运,高广领,王泽良,等.不同土壤钾素释放动力学及其供钾特征的研究[J].植物营养与肥料学报,1994,1(1):40-48.
- [14] 赵先丽,程海涛,吕国红,等.土壤微生物生物量研究进展[J].气象与环境学报,2006,22(4):68-72.
- [15] Williams A, Börjesson G, Hedlund K. The effects of 55 years of different inorganic fertiliser regimes on soil properties and microbial community composition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013,67:41-46.
- [16] 张凯,雷振山,严勇.不同施肥处理对高产小麦地上部和土壤中钾素积累动态的影响[J].中国农学通报,2006,22(2):259-262.
- [17] 刘会玲,崔江慧,许峰.小麦—玉米轮作周期内土壤钾素与作物吸收钾动态变化研究[J].土壤通报,2010,41(6):1440-1443.
- [18] 金继运,高广领,王泽良,等.温度对土壤钾素容量和强度(Q/D)关系的影响[J].土壤学报,1992,29(2):137-141.
- [19] 范钦桢,谢建昌.长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变[J].土壤学报,2005,42(4):591-599.
- [20] 谢建昌,周建民.我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J].土壤,1999,5(4):244-254.
- [21] Yu W T, Bi M L, Xu Y G, et al. Microbial biomass and community composition in a Luvisol soil as influenced by long-term land use and fertilization[J]. Catena, 2013,107:89-95.
- [22] Yuan H Z, Ge T D, Zhou P, et al. Soil microbial biomass and bacterial and fungal community structure responses to long-term fertilization in paddy soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013,13(5):877-886.
- [23] Marschner P, Kandeler E, Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003,35(3):453-461.

~~~~~  
 (上接第52页)

- [9] Leip A, Britz W, Weiss F, et al. Farm, land, and soil nitrogen budgets for agriculture in Europe calculated with CAPRI[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(11):3243-3253.
- [10] Qi Y C, Dong Y S, Jin Z, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and respiration in the desertified grasslands of Inner Mongolia, China [J]. Pedosphere, 2010,20(5):655-665.
- [11] Cao C, Jiang S, Ying Z, et al. Spatial variability of soil nutrients and microbiological properties after the establishment of leguminous shrub *Caragana microphylla* Lam. plantation on sand dune in the Horqin Sandy Land of Northeast China[J]. Ecological Engineering, 2011,37(10):1467-1475.
- [12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].南京:河海大学出版社,2000.
- [13] Xu W, Chen X, Luo G, et al. Soil organic carbon storage and its spatial distribution characteristic in the Sangong river watershed of arid region[J]. Journal of Natural Resources, 2009,24(10):1740-1747.
- [14] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[C]// Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSSA, Las Vegas(USA),30 Nov-1 Dec 1984. Pudoc., 1985.
- [15] 徐少君,曾波,苏晓磊,等.基于RS/GIS的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究[J].生态学报,2012,32(7):2174-2184.
- [16] 杨艳丽,史学正,于东升,等.区域尺度土壤养分空间变异及其影响因素研究[J].地理科学,2008,28(6):788-792.
- [17] Gao X J, Hu X F, Wang S P, et al. Nitrogen losses from flooded rice field[J]. Pedosphere, 2002,12(2):151-156.
- [18] Zhao J, Liu H, Sui Y, et al. Analysis for spatial heterogeneity of organic matter content and available nutrients in blacksoil crop area with different scales[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006,20(1):41-44.
- [19] 丘华昌,陈家宙.旱地土壤的供氮潜力[J].植物营养与肥料学报,1995,1(2):33-39.
- [20] 巨晓棠,刘学军,张福锁.不同氮肥施用后土壤各氮库的动态研究[J].中国生态农业学报,2004,12(1):92-94.
- [21] 鞠敏睿.小兴安岭森林土壤氮形态研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2010.
- [22] 张玉树.农业管理方式对亚热带土壤氮转化过程的影响[D].南京:南京师范大学,2015.
- [23] 赵彤,蒋跃利,闫浩,等.土壤氮化过程中微生物作用研究进展[J].应用与环境生物学报,2014,20(2):315-321.
- [24] 李兆富,杨桂山,李恒鹏.西苕河流域土地利用对氮素输出影响研究[J].环境科学,2006,27(3):498-502.