兰州地区农田土壤速效磷与速效钾含量的变化特征

陈银萍[1]，罗永清[2]，李玉强[2]，韩娟娟[2]，赵学勇[2]

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院，甘肃 兰州 730070；
2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 奈曼沙漠化研究站，甘肃 兰州 730000)

摘　要：以兰州地区 3 县 5 区不同利用方式农田为研究对象，从作物种类、土地利用强度和耕作方式 3 个角度采集 80 个样点表层土壤样品(0—20 cm)，对其 pH 值、电导率、速效磷和速效钾进行了分析。结果表明：(1) 兰州地区农田土壤 pH 值为 8.59，蔬菜地 pH 值低于其它作物农田，但差异不显著。重度利用农田土壤 pH 值低于轻度和中度农田，日光温室农田 pH 值低于大田和砂田，但差异不显著。(2) 土壤电导率具有较大的变异，变异系数高达 107.31%，不同作物种类、利用强度及耕作方式下土壤电导率不具有显著差异性。(3) 研究区土壤速效钾含量具有一致性，平均含量为 362.65 mg/kg，变异系数为 48.81%，不同作物种类、不同土地利用强度和耕作方式土壤速效钾不具有显著差异性。(4) 速效磷平均含量为 14.07 mg/kg，不同种类作物农田土壤中，蔬菜地速效磷高于其它种类作物；不同利用强度下，重度利用农田土壤速效磷高于中度和轻度农田；从耕作措施分析，日光温室农田土壤速效磷显著大于砂田和大田。研究表明，基于作物种类差异的不同土地利用方式及耕作措施对土壤酸碱性及速效磷含量具有不同程度的影响，集约型农业管理措施是导致速效磷含量增加的主要原因之一，且重度农田土壤有酸化的趋势。

关键词：农田土壤；利用方式；速效磷；速效钾

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2014)04-0046-07　　**中图分类号**：S153

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.023

Characteristics of Soil Available P and K of Farmland in Lanzhou Area

CHEN Yin-ping[1], LUO Yong-qing[2], LI Yu-qiang[2], HAN Juan-juan[2], ZHAO Xue-yong[2]

(1. *School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 2. *Naiman Desertification Research Station of the Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*)

Abstract: 80 surface soil(0—20 cm) samples of different farmlands from 3 counties and 5 districts of Lanzhou City were investigated, and pH value, electrical conductivity(EC), available phosphorus and available potassium contents were analyzed according to crop species, intensity of land use and tillage method. The results showed that: (1) Average pH value was 8.59, and pH value in farmland where vegetables were grown tended to be lower than in other soils, but the differences were insignificant. Soil pH value in intensively used farmland was significantly lower than in moderately and slightly used farmland. Greenhouse soil pH value average tended to be lower than in traditional farmland and sand-covered fields, but it is not significantly. (2) There was a high variance in EC in the study area, and the coefficient of variance (C_v) was up to 107.31%. Differences of EC between different crop species, intensities of land use and tillage methods were all insignificant. (3) Soil available K showed in low variance, and the mean content and C_v was 362.65 mg/kg and 48.81%, respectively. The differences in available K were insignificant between different crop species, intensities of land use and tillage methods. (4) Mean content of soil available P was 14.07 mg/kg. Available P in farmland where vegetables were grown was higher than those in others. Sorted by land use intensity, available P was significantly higher in intensively used land soil than in moderately and slightly used soils. There was more available P in greenhouse soil than in sand-covered soil and traditionally used fields. The

收稿日期：2013-07-31　　**修回日期**：2013-09-21

资助项目：国家自然科学基金项目“重金属胁迫下 NO 信号在植物中的传递和作用机理研究”(31260089)，圆柏属植物亚细胞抗氧化酶系统对低温胁迫的响应机理”(31060060)，“科尔沁沙地农田生态系统碳通量特征及其对耕作措施的响应”(31170413)

作者简介：陈银萍(1974—)，女(汉族)，甘肃省榆中县人，博士，教授，主要从事环境生态学研究。E-mail：yinpch@mail.lzjtu.cn。

conclusion of this study was that crop species, land use intensity and tillage methods could affect pH value and available P content of farmland soil, and acidification and increase of available P content of soils may be mainly due to intensive management of farmland.

Keywords: farmland soil; land use; available phosphorus; available potassium

磷元素在自然界主要以岩石态和溶岩态存在,随岩石风化进入土壤以后,通过土壤物质及土壤微生物的共同作用,使土壤中处于稳定态的磷元素被活化为活跃态磷,再通过植物根系的吸收,进入生态系统,参与生态系统的物质与能量循环[1]。磷是土壤元素的重要组成部分,也是植物生长的必需元素之一。磷是植物体的许多功能性物质及酶的组要组分,在植物体内通过 ATP 合成、光和磷酸化和氧化磷酸化等生理合成与代谢过程,对植物体的生长产生影响[2]。钾在自然界中以各类盐的形式存在,在土壤溶液或水中解离成 K^+ 而被植物体吸收,钾元素在植物体的生理代谢过程中具有至关重要的作用,如参与植物细胞水平衡与渗透势调节、改变活细胞中酶和其他功能性蛋白的活性、参与糖类的合成和运转等[2],因此,钾是植物生长的必需元素之一。磷元素和钾元素为土壤肥力的重要指标,直接影响到土壤的初级生产。同全效养分相比较,速效养分可直接被植物体吸收利用,所以说,速效养分的高低更能直接地反映土壤肥力状况。同时,农田土壤速效养分对重金属的存在形态及作物吸收有一定的影响[3]。此外,通过淋溶作用,土壤中的磷元素进入水体造成水体的富营养化已成为目前富营养化研究的焦点[4-8]。农业生产过程中,在保证农业生产的前提下又对环境不构成污染,并保证食品安全已成为未来农业发展的方向。本研究以兰州地区农田土壤中速效磷与速效钾为研究对象,通过对不同类型及不同利用强度农田土壤中速效磷和速效钾含量的测定,对研究区农田土壤速效磷和速效钾的含量特征进行分析,旨在为研究区农业生产及环境保护提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

以兰州市所辖 5 区(安宁区、城关区、红古区、七里河区、西固区)3 县(皋兰县、永登县榆中县)农田土壤为研究对象。兰州市位于中国陆域版图的几何中心,总面积 13 085.6 km^2,处在东经 102°—104°,北纬 35°～37°之间,平均海拔 1 670 m。该地区年降水量 290～360 mm,蒸发量 1 400 mm,平均气温 6.5 ℃,无霜期平均 140 d,为北温带半干旱大陆性半季风气候。境内地貌复杂,土层深厚,质地良好,土壤类型主要为黄土起源的粉砂壤土,属于薄层典型干旱土(haplic orthic aridisols)[9]。气候特点干旱少雨,光热资源丰富,季节冷暖分明,昼夜温差大。

结合研究区农业发展具体状况选取 80 个样点,根据耕作方式,将样点划分为常规大田、日光温室农田及兰州地区特有的砂田 3 种,样本容量分别为常规大田 65 个,日光温室农田 11 个,砂田 4 个。根据农田利用强度,将样点划分为 3 类:百合、果园苗圃等耕作频率低,人为活动较少,划分为轻度利用农田,样本数量为 19 个;玉米、小麦(包括春小麦与冬小麦)等种植周期约在 1 a,耕作频率相对较高,划分为中度利用农田,包含 35 个样本;蔬菜(菜花、辣椒、黄瓜、番茄、白菜、娃娃菜、甘蓝、马铃薯等)由于耕作周期短,一般小于 1 a,且人为活动剧烈,划分为重度利用农田,样本数量为 26 个。

1.2　样品采集与分析

土壤采样用梅花布点法,于每个样点设置 5—10 个采集点,在各个采集点表层(0—20 cm)等量取土,使混合后的土样达到约 2 kg。土样装入塑料袋内,贴签,带回实验室备用。将采集的土样剔除草根、玻璃、石块等异物,摊晾在实验室通风避光处自然风干,按照四分法取样约 500 g 置于木盘中,用木棒碾碎,过 2 mm尼龙筛,弃去沙子、石块等。速效磷与速效钾分别采用钼锑抗比色法和火焰光度计法[10]测定;土壤 pH 值与电导率分别采用电位法(水土比为 2.5∶1)和电导法(水土比为 5∶1)测定[10]。为了保证测定数据的可靠性,测定时每分土样做 3 组平行,测定后取平均值作为最终测定结果。

1.3　数据计算及处理

数据采用 Excel 和 SPSS 10.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析对差异性进行显著性分析,用最小显著性差异(LSD)多重比较方法,在 95% 的可靠性下对不同类型土壤之间差异性进行比较分析。

2　结果与分析

2.1　不同作物农田土壤养分

由表 1 可以看出,在本研究的 80 个农田样点中,土壤总体呈碱性,平均 pH 值为 8.59。从作物种类来看,土壤酸碱性不具有显著差异性($F=1.95$, $p>0.05$),各类农田土壤 pH 值为 8.50～8.80,整体变异程度较小,变异系数为 2.72%,但不同种类作物农田土壤 pH 值具有不同的变异性,其中蔬菜地土壤 pH 值的

变异剧烈，高于其它种类农田，具体表现为叶类蔬菜和果实类蔬菜地土壤 pH 值的变异系数分别为 4.03%和 3.18%，位于所研究的 10 类农田的前 2 位；菜花农田土壤 pH 值也具有较大的变异程度，变异系数为 2.91%；在研究区最主要的两种作物玉米和小麦农田中（样本数分别为 11 和 12），土壤酸碱性均一程度较好，pH 值变异较小，变异系数分别为 2.35%和 1.97%；撂荒地土壤酸碱性变异最小，变异系数仅为 0.44%；而在耕作相对单一的农田土壤中，土壤酸碱性的变异程度小于其它农田而高于撂荒地：百合农田和西（甜）瓜农田的 pH 值变异系数均在0.9～1.2 之间；而在果园苗圃的 17 个样本土壤中，虽然耕作程度相对较单一，但 pH 值变异较大，这可能与不同苗木具有不同的耕作特点有关。研究区农田土壤的电导率为 0.35 μS/cm。各类作物农田土壤电导率与 pH 值类似，不具有显著差异性（$F=0.26$，$p>0.05$），但 10 类作物农田土壤的电导率均具有更大的变异程度，变异系数在 44.51～134.00%之间。从各类样地土壤电导率的变异系数对比发现，电导率具有与 pH 值相反的特征，即在耕作措施单一的农田中，变异系数高于耕作强度高的农田，如小麦、玉米农田和撂荒地土壤电导率的变异系数分别为 116.77%，133.24%和 129.06%，而在叶类蔬菜农田、果实蔬菜农田和菜花农田土壤中分别为 57.48%，67.52%和 54.65%（表 1）。

研究区农田土壤速效磷平均含量为 14.07 mg/kg。同其它 3 个指标比较，80 个样点间速效磷的变异程度最剧烈，最大值和最小值分别为 35.23 和 4.54 mg/kg，分别出现在百合农田和果实类蔬菜农田。10 类作物农田的速效磷含量存在显著差异性（$F=3.36$，$p<0.01$），其中果实类蔬菜和叶类蔬菜农田速效磷含量最高，分别为平均含量的 2.50 和 1.71 倍；西（甜）瓜农田的速效钾含量也维持在一个较高的水平，超出平均含量 25%；其余农田土壤中的速效磷含量较低，均低于平均含量，其中百合农田和撂荒地土壤速效磷含量最低，分别仅为平均含量的 32%和 40%，菜花农田和小麦农田土壤中的速效磷含量较低，分别低于平均含量 46%和 42%。从变异程度来看，不同作物农田具有不同的变异：百合、果园苗圃、玉米农田及撂荒地土壤的变异程度较小，变异系数均小于 40%；菜花、小麦马铃薯、叶类蔬菜及西甜瓜农田中的变异较大，变异系数为 50.14%～77.39%；而果实类蔬菜农田速效磷的变异最大，变异系数为 112.97%（表 1）。

研究区农田速效钾含量为 362.65 mg/kg，不同作物农田土壤间不存在显著差异性（$F=1.62$，$p>0.05$）。其中马铃薯、小麦和番瓜农田速效钾含量较高，分别为 490.59，480.15 和 427.68 mg/kg；此外，西（甜）瓜农田中的速效钾含量也较高，高出平均含量 9%；而在其它作物农田中，速效钾含量均低于平均含量，如在百合、叶类蔬菜及果园苗圃农田土壤中，速效钾含量分别低于平均含量 12%，13%和 17%；撂荒地土壤中速效钾含量最低，仅为平均含量的 78%。从变异程度来看，研究区农田土壤速效钾变异系数为 48.81%，但在不同作物农田土壤中有不同的特征：玉米、叶菜农田及撂荒地土壤速效钾变异程度剧烈，变异系数均大于 55%；百合、果园苗圃、马铃薯及西甜瓜农田土壤速效钾变异系数均小于 40%；其余 3 类作物农田速效钾变异系数均在 40%～55%之间（表 1）。

表 1 不同作物农田土壤 pH 值、电导率、速效磷与速效钾含量

作 物	样本数	pH 值	电导率/(μS·cm^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})
百 合	3	8.67±0.06a	0.31±0.11a	319.17±38.88a	4.54±1.01b
菜 花	5	8.50±0.11a	0.28±0.07a	335.91±61.02a	7.60±1.78b
小 麦	12	8.59±0.05a	0.48±0.16a	480.15±63.45a	8.10±1.17b
果 园	17	8.64±0.05a	0.35±0.11a	299.41±24.90a	9.90±1.07b
土 豆	5	8.80±0.06a	0.21±0.05a	490.59±82.37a	10.22±2.61b
玉 米	11	8.64±0.06a	0.34±0.14a	326.58±56.07a	11.67±1.49b
叶类蔬菜	12	8.39±0.10a	0.35±0.06a	314.29±54.52a	24.10±4.72a
撂荒地	4	8.69±0.02a	0.38±0.25a	283.00±78.04a	5.62±1.06b
西（甜）瓜	4	8.66±0.04a	0.29±0.07a	395.11±43.41a	17.64±6.83ab
番 瓜	7	8.56±0.10a	0.31±0.08a	427.68±83.91a	35.23±15.04a
F 值		1.95	0.26	1.62	3.36
显著性		0.06	0.98	0.13	<0.01

注：表中数据为平均值±标准误；多重比较方法为 LSD 法，显著性水平为 0.05，同列数据中有相同字母表示在 0.05 水平上不具有显著差异性。下同。

2.2　不同利用强度农田土壤速效磷、速效钾含量

由图 1 可以看出,农田利用强度对土壤 pH 值有显著的影响,不同利用强度农田土壤的酸碱性具有显著差异性($F=3.80$, $p<0.05$)。这种差异性在轻度农田和中度农田间不显著,pH 值分别为 8.63 和 8.65,但在重度农田(pH=8.50)中,pH 值显著低于前两者。

由此说明,高强度的农业措施,如蔬菜种植过程中大量的化肥和农药使用及频繁的灌溉措施等可导致土壤 pH 值的降低。不同利用强度下农田土壤电导率分别为 0.35 μS/cm(轻度农田),0.37 μS/cm(中度农田)和 0.32 μS/cm(重度农田),但其差异不具有显著性($F=0.12$, $p>0.05$)。不同利用强度下农田土壤速效磷存在极显著的差异性($F=8.67$, $p<0.01$),具体表现在重度利用农田速效磷含量显著高于中度和轻度利用农田,其含量高达 23.83 mg/kg,约为后两者的 2.5 倍,在中度和轻度利用农田中,土壤速效磷含量分别为 9.41 和 9.30 mg/kg,且两者之间不具有显著差异性($p>0.05$)。不同利用强度农田土壤速效钾含量均维持在一个较高的水平。3 类农田土壤中,中度农田速效钾含量最高,为 384.72 mg/kg,重度农田次之,为 356.22 mg/kg,轻度农田最低,为 303.32 mg/kg。最高平均含量(中度农田)仅为最低平均含量(轻度农田)的 1.27 倍,但方差分析显示,速效钾在不同利用强度农田土壤中的含量不具有显著差异性($F=1.26$, $p>0.05$)。

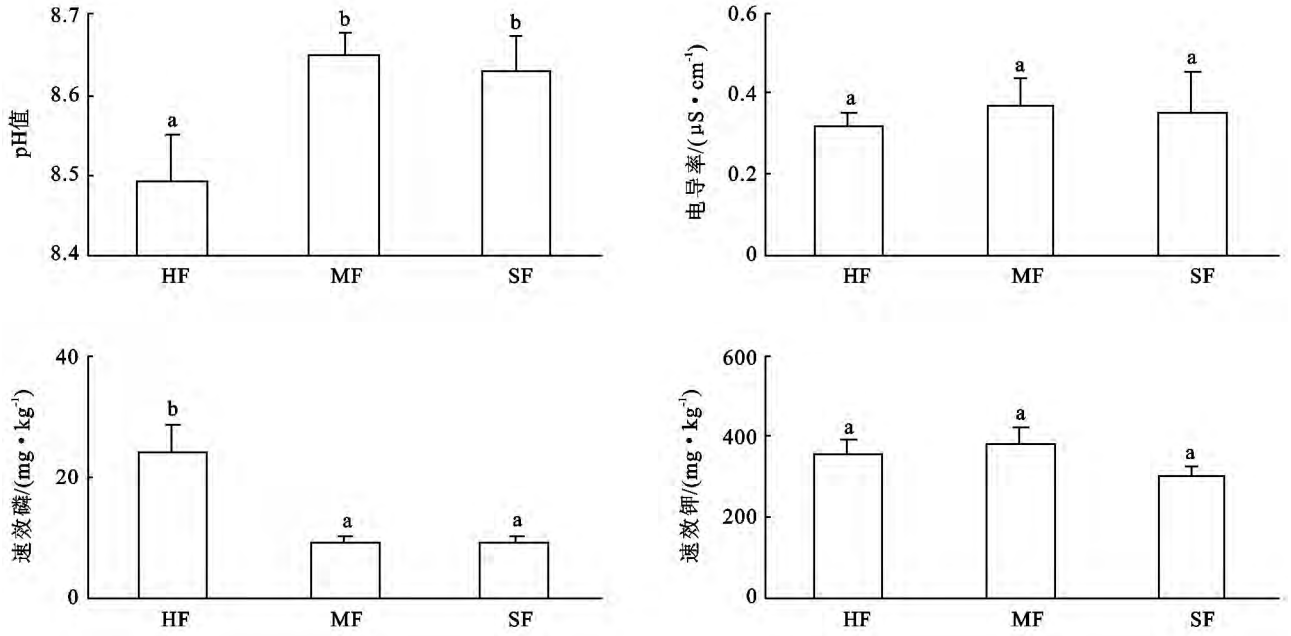


图 1　重度(HF)、中度(MF)及轻度(SF)利用农田土壤 pH 值、电导率、速效磷及速效钾

2.3　不同利用方式农田土壤速效磷、速效钾分析

利用方式对农田土壤的酸碱性的影响不同。由图 2 可以看出,3 种利用方式农田土壤 pH 值具有“砂田>传统农田>日光温室”的特征,但差异较小,不具有显著性($F=2.20$, $p>0.05$)。

3 种利用方式农田土壤的电导率分别为:传统农田 0.33 μS/cm,日光温室 0.46 μS/cm,砂田 0.27 μS/cm。其中日光温室土壤电导率为砂田的 1.71 倍,但这种差异不显著($F=0.66$, $p>0.05$)。与 pH 值不同,不同利用方式农田土壤的电导率的变异程度更大,尤其是在日光温室的 11 个样本中,变异系数达 125.34%,大田的 65 个样本的变异系数也较高,为 101.96%。

不同利用方式对农田土壤速效磷含量具有显著影响($F=9.04$, $p<0.01$),其中日光温室土壤含量最高,为 30.93 mg/kg,显著高于传统农田土壤,为后者的 2.82 倍,但与砂田土壤不具有显著差异。从变异程度来看,日光温室土壤的变异最强烈,变异系数为 113.92%,其余两者的变异较小,变异系数分别为大田 64.49%,砂田 76.03%。

速效钾在不同利用方式农田土壤中的含量不存在显著差异性,其中砂田土壤的速效钾含量略高于平均含量,为 375.63 mg/kg,日光温室土壤中的速效钾含量最低,为 345.95 mg/kg。与速效磷和电导率不同,3 类利用方式农田中速效钾的变异程度较小,变异系数均低于 60%。

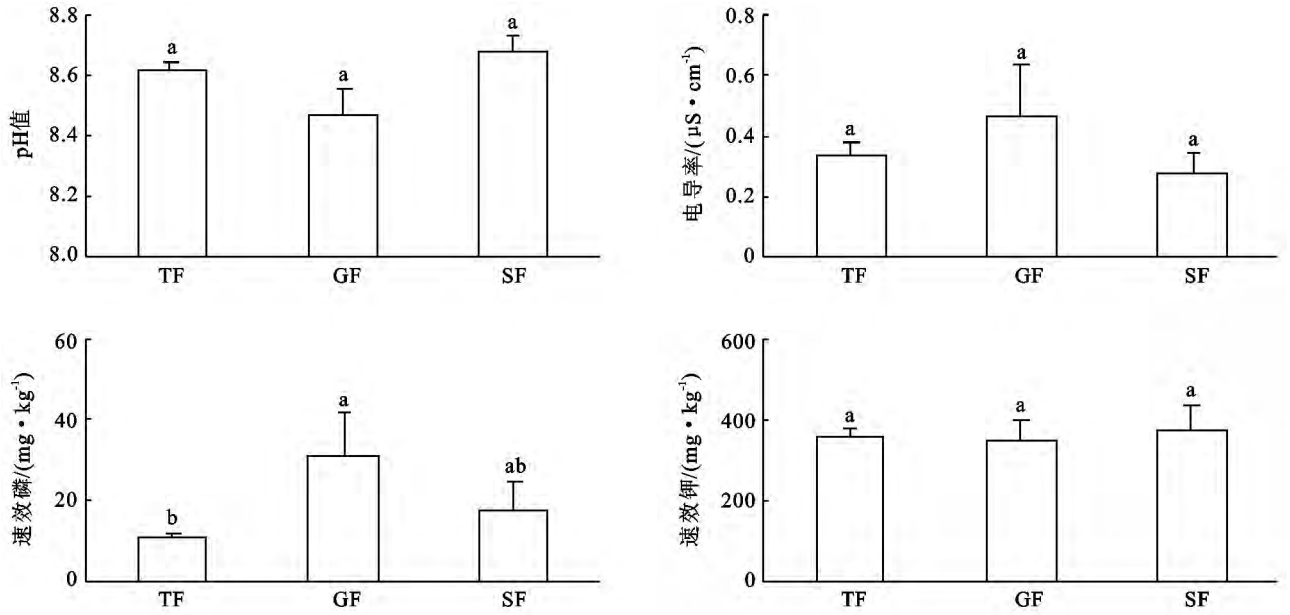


图 2 传统农田(TF)、日光温室(GF)及砂田(SF)土壤 pH 值、电导率、速效磷及速效钾

3 结果讨论

土壤 pH 值除对土壤盐基饱和度[11]、微生物数量等[12]有重要影响以外，对植物的生长也有一定的影响，如土壤 pH 值升高抑制了茶树对土壤 Mn 的吸收[13]；pH 值下降抑制了烤烟对土壤钾的吸收[14]；对羽扇豆(*Lupinus polyphyllus*)的超氧化物歧化酶(SOD)，过氧化物酶(POD)，过氧化氢酶(CAT)和丙二醛(MDA)等生理指标有不同程度的影响[15]；土壤 pH 值的增加提高了苹果果实的综合品质[16]。此外，真菌为媒介的病毒病发生面积扩大已成为土壤 pH 值变化影响农业生产的一个信号[17]，因此，农田土壤 pH 值变化的研究具有重要意义。研究表明[17-19]，近 20～30 a 以来，土壤 pH 值具有酸化的趋势，这种趋势除受大气沉降等因素影响以外，农业措施也是一个重要因素。赵庚星等[20]研究表明，不同耕地利用方式对土壤有不同的影响，蔬菜种植地土壤 pH 值低于粮食种植地土壤，这与本研究的结论一致。郭荣发等[21]研究指出，种植制度对土壤 pH 值具有一定的影响。本研究中，重度利用农田土壤的 pH 值显著低于中度和轻度利用农田，这可能和重度农田中相对密集的灌溉有关。有研究表明[22]，长期灌溉可导致土壤 pH 值的下降，尤其是沟灌，这种作用更明显。本研究中，沟灌是最主要的灌溉形式。因此，重度农田相对密集的灌溉可能是导致其土壤 pH 值下降的因素之一。此外，施肥也可造成土壤 pH 值的下降。鲁艳红等[23]的研究表明，化肥、猪粪和稻草的使用均导致了稻田土壤 pH 值的下降。有研究指出，大量有机肥的使用可改善土壤物理以及生物化学性质[24-25]。本研究中，重度利用农田在化肥和农家肥的使用量和使用频度上均高于中度和轻度利用农田，这可能是造成重度农田土壤 pH 值显著低于轻度和中度的另一原因。另外，种植模式对土壤 pH 值有一定的影响。李菡等[26]研究了玉米/小麦轮作、露天蔬菜、日光温室蔬菜和塑料大棚蔬菜 4 种不同种植模式土壤 pH 特征，结果表明，蔬菜种植地土壤 pH 值显著低于玉米/小麦轮作农田，不同模式蔬菜种植农田，土壤 pH 值也有显著差异性。本研究中，也有日光温室土壤 pH 值小于大田的现象，但差异不显著。日光温室作物中，主要包括蔬菜、苗木及果木等，因此，不同作物本身特点及相应耕作措施的差异导致土壤 pH 值的不均一性，这可能是造成日光温室农田土壤 pH 值与其它类型农田差异性不显著的主要因素。

电导率是平均土壤的重要指标之一。土壤电导率受多种因素影响，如土壤水分、盐分浓度、氯离子、钠吸附比等[27-28]。而此前的研究[29]表明，兰州地区土壤在盐渍化程度和水化学特征方面具有很大的差异。本研究中，无论从不同作物类型还是农田利用强度与方式来看，土壤电导率都具有较大的变异性，这可能与土壤本身及当地水化学特征的差异性有关。

土壤中的速效磷直接关系到植物的初级生产能力。有研究表明[30]，实验期间土壤速效磷的减少量与苜蓿干草产量成正比。而出于经济效益目的的增产措施，导致了蔬菜地和重度利用农田中化肥的大量使用，这是导致该类样地土壤速效磷增加的重要原因。有研究对菜地、农田、果园、林地和草地 5 种类型

土壤的养分状况进行了研究,结果表明,菜地速效磷含量显著高于其它类型样地,并指出菜地过量使用化肥导致了氮磷的积累[31]。在此前关于氮素的研究[32]中发现,兰州地区农田氮肥的使用导致了浅井水和泉水中硝态氮的增加。本研究中,重度农田($F=8.67$, $p<0.01$)土壤速效磷含量显著高于中度和轻度利用农田、日光温室也显著高于大田和砂田,在不同作物农田土壤中,蔬菜地(包括叶类蔬菜和果实类蔬菜)速效磷含量也有较高的含量(表 1),据此推断,化肥的使用是造成兰州地区农田土壤速效磷增加的直接原因。

土壤中的速效磷含量水平受到土壤中全磷的影响,有研究[31]表明,土壤中的速效磷与全磷具有良好的线性关系。而土壤的酸碱性可影响到全磷中缓效磷的释放与转化。有研究[33]发现,添加有机酸导致土壤中速效磷的增加。本研究发现,土壤 pH 值与速效磷呈显著的指数关系,在一定范围内,土壤速效磷随 pH 值的增加而降低。这可能是由于不同利用方式农田中的人为活动(灌溉、施肥等)加剧了土壤的酸化,进而促进了缓效磷向速效磷的释放。据此推断,灌溉等农艺措施是导致速效磷变化的间接因素。

土壤速效钾对植物的生长具有重要作用。研究[34-36]表明,施用钾肥可提高作物的产量与质量。施肥对土壤速效钾和全钾的影响不同,在钾元素不足地区,通过施肥的钾元素补充可迅速促进土壤速效钾的增加并形成增产[35];但在钾元素充足地区,长期施肥虽提高了土壤速效钾含量,但一方面,长期施肥对土壤全钾含量没有显著影响,另一方面,长期不施肥土壤速效钾也没有显著降低[36]。因此,土壤中速效钾含量与土壤本身的钾含量有关。本研究中,不同作物种类、不同土地利用强度和不同耕作方式下,土壤速效钾含量均不具有显著差异性,这可能与研究区充足的土壤钾水平有关,即作物种类、土地利用强度和耕作方式对土壤速效钾的影响不明显。

4　结论

(1) 不同土壤指标对农田作物种类、土地利用强度及耕作方式的响应不同。

(2) 电导率和速效钾对土地利用强度、作物种类及耕作方式的响应不明显,而速效磷对作物类型、利用强度及耕作方式的响应强烈。

(3) 集约型管理措施导致农田土壤中速效磷有相对较大的富集。

(4) 重度利用农田土壤有酸化的趋势,这可能与该类型作物农田相对较高频率的灌溉和施肥措施有关。

[参 考 文 献]

[1] 蔡晓明. 生态系统生态学[M]. 北京:科学出版社,2002.

[2] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社,2004.

[3] 罗永清,陈银萍,陶玲,等. 兰州土壤—蔬菜系统铅污染特征及全钾速效钾与 pH 对其富集特性影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(8):1477-1482.

[4] Recknagel F, Cao H, Kim B, et al. Unravelling and forecasting algal population dynamics in two lakes different in morphometry and eutrophication by neural and evolutionary computation[J]. Ecological Informatics, 2006,1(2):133-151.

[5] 陈学民,朱阳春,伏小勇,等. 青海湖表层沉积物营养元素分布特征及相关性分析[J]. 农业环境科学学报,2012,31(2):395-401.

[6] 程曦,李小平. 淀山湖氮磷营养物 20 年变化及其藻类增长响应[J]. 湖泊科学,2008,20(4):409-419.

[7] 高光,胡文英,李宽意. 氮、磷等营养物质对低洼盐碱地鱼塘水质的影响[J]. 湖泊科学,2001,13(4):345-350.

[8] Wang Chao, Qian Jin, Guo Zhiyong, et al. Vertical distributions of phosphorus fractions in sediments of three typical shallow urban lakes in P. R. China[J]. Polish Journal of Environmental Study,2008,17(1):155-162.

[9] Li Xiaoyan, Shi Peijun, Liu Lianyou, et al. Influence of pebble size and cover on rainfall interception by gravel mulch[J]. Journal of Hydrology,2005,312(1):70-78.

[10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[11] 毛红安,谢德体,杨剑虹. 重庆市江津柑橘果园土壤 pH 与盐基饱和度的关系探讨[J]. 土壤通报,2005,36(6):877-879.

[12] 张强,魏钦平,齐鸿雁,等. 北京果园土壤养分和 pH 与微生物数量的相关分析及优化方案[J]. 果树学报,2011,28(1):15-19.

[13] 谢忠雷,董德明,李忠华,等. 茶园土壤 pH 值对茶叶从土壤中吸收锰的影响[J]. 地理科学,2001,21(3):278-281.

[14] 黎成厚,刘元生,何腾兵,等. 土壤 pH 与烤烟钾素营养关系的研究[J]. 土壤学报,1999,36(2):276-281.

[15] 王庆,刘安成,张瑞博,等. 土壤 pH 对羽扇豆叶片保护酶活性的影响[J]. 西北林学院学报,2010,25(6):10-12.

[16] 李庆军,林英,李俊良,等. 土壤 pH 和不同酸化土壤改良剂对苹果果实品质的影响[J]. 中国农学通报 2010,26(14):209-213,220.

[17] 王长松,程莉萍,孔祥英,等. 仪征市 30 多年来土壤 pH 值时空变化趋势及原因分析[J]. 江苏农业科学,2007(3):223-224.

[18] 王志刚,赵永存,廖启林,等.近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力[J].生态学报,2008,28(2):720-727.
[19] 郭治兴,王静,柴敏,等.近 30 年来广东省土壤 pH 值的时空变化[J].应用生态学报,2011,22(2):425-430.
[20] 赵庚星,李秀娟,李涛,等.耕地不同利用方式下的土壤养分状况分析[J].农业工程学报,2005,21(10):55-58.
[21] 郭荣发,杨杰文.成土母质和种植制度对土壤 pH 和交换性铝的影响[J].生态学报,2004,24(5):984-990.
[22] 虞娜,张玉龙,黄毅,等.保护地不同灌溉方法表层土壤 pH 小尺度的空间变异[J].土壤,2008,40(5):828-832.
[23] 鲁艳红,杨曾平,郑圣先,等.长期施用化肥、猪粪和稻草对红壤水稻土化学和生物化学性质的影响[J].应用生态学报,2004,21(4):921-929.
[24] 卫婷,韩丽娜,韩清芳,等.有机培肥对旱地土壤养分有效性和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):611-620.
[25] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.旱地施有机肥对土壤有机质和水稳性团聚体的影响[J].应用生态学报,2012,23(1):159-165.
[26] 李菡,孙爱清,郭恒俊.农田不同种植模式与土壤质量的关系[J].应用生态学报,2010,21(2):365-372.
[27] 孙宇瑞.土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J].中国农业大学学报,2000,5(4):39-41.
[28] 刘广明,杨劲松,姚荣江.影响土壤浸提液电导率的盐分化学性质要素及其强度研究[J].土壤学报,2005,42(2):247-252.
[29] 陈银萍,罗永清,陶玲,等.兰州市农村生活用水的水化学特征分析[J].中国生态农业学报,2011,19(1):63-68.
[30] 贾宇,徐炳成,李凤民,等.半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素有效性及对生产力的响应[J].生态学报,2007,27(1):42-47.
[31] 陆安祥,赵云龙.王纪华,等.不同土地利用类型下氮—磷在土壤剖面中的分布特征[J].生态学报,2007,27(9):3923-3929.
[32] 陈银萍,罗永清,陶玲,等.兰州市农村饮用水中硝态氮分布特征及评价[J].农业环境科学学报,2011,30(1):183-189.
[33] 章爱群,贺立源,赵会娥,等.有机酸对土壤无机态磷转化和速效磷的影响[J].生态学报,2009,29(8):4061-4069.
[34] 吴全,徐泽.四川茶园土壤速效钾动态变化及施钾效果[J].土壤肥料,1996(2):45-46.
[35] 都大俊,王崇乐,张可安,等.安康耕地土壤速效钾现状与钾肥效应[J].水土保持研究,2001,8(2):153-156.
[36] 葛玮健,常艳丽,刘俊梅,等.缕土区长期施肥对小麦—玉米轮作体系钾素平衡与钾库容量的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(3):629-636.

(上接第 45 页)

[3] 姚俊强,杨青,陈亚宁,等.西北干旱区气候变化及其对生态环境影响[J].生态学杂志,2013,32(5):1283-1291.
[4] 陈亚宁,杨青,罗毅,等.西北干旱区水资源问题研究思考[J].干旱区地理,2012,35(1):1-9.
[5] 蓝永超,胡兴林,肖生春,等.近 50 年疏勒河流域山区的气候变化及其对出山径流的影响[J].高原气象,2012,31(6):1636-1644.
[6] 钟海玲,李栋梁.河西内陆河流量对高原加热场强度的响应[J].水科学进展,2008,19(2):179-183.
[7] 徐浩杰,杨太保.1981—2010 年柴达木盆地气候要素变化特征及湖泊和植被响应[J].地理科学进展,2013,32(6):868-879.
[8] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
[9] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:63-65.
[10] Hurst H E. Long term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1951,116(3):770-799.
[11] 丁永建,叶柏生,刘时银.祁连山区流域径流影响因子分析[J].地理学报,1999,54(5):431-437.
[12] 蓝永超,康尔泗,张济世,等.近 50 年来 ENSO 与祁连山区气温降水和出山径流的对应关系[J].水科学进展,2002,13(2):141-145.
[13] 魏娜,巩远发,孙娴,等.西北地区近 50 a 降水变化及水汽输送特征[J].中国沙漠,2010,30(6):1450-1457.
[14] 施雅风,沈永平,胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J].冰川冻土,2002,24(3):219-226.
[15] 王宁练,贺建桥,蒲健辰,等.近 50 年来祁连山七一冰川平衡性高度变化研究[J].科学通报,2010,55(32):3107-3115.