天津市不同功能区土壤物理特性研究

李 银[1,2], 杨 洁[1], 李 岩[1]

(1. 天津市水利科学研究院, 天津 300061; 2. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘 要: [目的] 对天津市常用绿化土壤的基本性质以及渗透性能进行研究,为天津市下凹式绿地的设计及推广应用提供理论依据。[方法] 选取天津市不同功能区不同植被类型(草坪、灌木)的土壤,对土壤的颗粒组成、容重、孔隙度以及渗透系数进行研究,并分析天津土壤性质间的相关性。[结果] 天津市除老居民生活区属于粉土外,其他功能区均属于粉质黏土。受人为扰动影响,各功能区绿化土壤容重大,孔隙度较低,土壤压实严重,其中土壤容重为 1.34～1.55 g/cm^3,土壤孔隙度为 42.50%～52.80%;各功能区的渗透系数差异很大,范围为 8.8E－06～1.3E－03 cm/s,大小趋势主要受人为因素的影响,表现为:文教区>居民生活区>工业区>郊区林带>公园区>道路交通区;植被类型对土壤渗透系数有影响,为草坪>灌木。土壤的渗透系数与土壤含水率、土壤容重呈负相关性,与土壤孔隙度呈正相关性;土壤容重与土壤孔隙度呈极显著负相关。[结论] 天津地区土壤压实严重,草坪与灌木土壤以弱透水和中等透水为主。

关键词: 功能区; 植被类型; 土壤物理特性; 渗透性能; 天津市

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2018)04-0331-06 **中图分类号**: S152

文献参数: 李银, 杨洁, 李岩. 天津市不同功能区土壤物理特性研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 331-336. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.052. Li Yin, Yang Jie, Li Yan. Physical properties of soil from different functional areas in Tianjin City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 331-336.

Physical Properties of Soil from Different Functional Areas in Tianjin City

LI Yin[1,2], YANG Jie[1], LI Yan[1]

(1. *Tianjn Hydraulic Science Research Institute*, *Tianjin* 300061, *China*; 2. *Institute of Land Engineering and Technology*, *Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd*, *Xi'an*, *Shaanxi* 710075, *China*)

Abstract: [Objective] Studying the characteristics and permeability of commonly used green soil in Tianjin City, in order to provide theoretical basis for the design and promotion with application of low elevation greenbelt in Tianjin City. [Methods] Different functional areas and different vegetation types(lawn, shrubs) of soil were selected to study soil particle composition, bulk density, porosity and permeability coefficient and to analyze the correlation among soil properties. [Results] The functional areas belonged to silty clay except for the old residential with silty soil. Affected by artificial disturbance, the green soil had greater bulk density, low porosity and severe soil compation. Soil bulk density was 1.34～1.55 g/cm^3, soil porosity was 42.50%～52.80%. There were significant differences in permeability coefficient of each functional area, the range was 8.8E－06～1.3E－03 cm/s, the size trend was mainly influenced by artificial factors, ranked as follows: cultural and educational zone>residential zone>industrial zone>suburban forest zone>park zone>traffic zone; Vegetation type had an influence on soil permeability coefficient. The permeability coefficient of soil was negatively correlated with soil moisture content and soil bulk density, positive correlation with soil porosity. Soil bulk density was significantly negatively correlated with soil porosity. [Conclusion] The soil compaction is serious in Tianjin City, the lawn and shrub of soil is dominated by weak permeable water and medium permeable water.

Keywords: **functional area; vegetation type; physical characteristics; permeability; Tianjin City**

收稿日期: 2018-02-13 **修回日期**: 2018-03-27

资助项目: 天津市水务局科技计划项目"海绵城市下凹式绿地雨水蓄渗与利用关键技术研究"(KY2015-03)

第一作者: 李银(1989—),女(汉族),陕西省渭南市人,硕士研究生,工程师,主要从事城市土壤生态方面的研究。E-mail:465481101@qq.com。

通讯作者: 杨洁(1979—),女(汉族),河北省石家庄市人,博士研究生,高级工程师,主要从事水环境与水污染治理方向研究。E-mail:yj@tjhri.com。

天津市地处海河流域的下游，由于地势低洼，又处于九河下梢，经常遭受洪、涝、潮等灾害的侵袭，因此天津的防洪灾问题一直是水利部门工作的重中之重。而大量研究表明下凹式绿地对提升城市绿地的水文调蓄功能具有重要意义[1-3]。但在实际实施中由于土壤渗透条件不同，绿地植被选取、降雨径流等因素的不同，土地使用规划和景观规划等限制，因此在设计下凹式绿地时，不能简单的套用设计规范，必须根据实际对下凹式绿地的设计参数进行分析和优化，才能得出一种适应当地条件的适用性较强的配置模式。而下凹式绿地土壤的特性以及渗透能力对下凹式绿地的植物选取、下凹深度以及绿地面积的设计至关重要。据此文中对天津市常用绿化土壤的基本性质以及渗透性能进行研究，以便为天津市下凹式绿地的设计及推广应用提供参考及理论依据。城市化过程中土壤的利用方式发生改变，从而使土壤环境和土壤理化性质发生明显的变化[4]。植被类型会使土壤表面的覆盖程度不尽相同，造成了土壤温度、湿度的不同，加之不同植被群落结构植物的生长状况、枯枝落叶多少有别，从而影响了土壤微生物的数量和活动状况[5-6]，以及土壤物理化学特性。因此文中选自天津不同功能区不同植被类型下的土壤进行研究。以往的研究主要集中于土壤的化学性质上[7-9]，对有关天津土壤物理特性的研究不多，而土壤物理特性中土壤含水率、土壤容重以及土壤孔隙度对土壤的渗透性能有很重要的影响。刘汗等[10]在研究土壤含水率对黏黄土入渗性能的影响中发现土壤含水率越高土壤入渗能力越小；刘艳丽等[11]在不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性研究中发现，有植被土地利用方式的土壤容重降低，而土壤孔隙度与饱和含水量有相应的提高；檀海洋等[12]对不同功能区城市土壤理化性质及入渗特性研究中得出土壤密度越大将使孔隙度变小，土壤渗透性变弱。可见，土壤的物理性质显著影响土壤的渗透性能，从而影响下凹式绿地的设计。因此，文中选取天津市不同功能区不同植被类型（草坪、灌木）的土壤进行物理特性以及渗透性能研究。

1 试验材料

根据天津市土地利用类别和人类活动强度，选取天津不同功能区土壤，包括公园区（水上公园、梅江公园）、郊区林带（郊野公园）、文教区（天大校区）、居民生活区（南开大学居民区）、道路交通区、工业区，具体的经纬度详见表1。在不同植被类型（草坪、灌木）下选择具有代表性的3个样地，共42个样地，每个样地采集0—30 cm的表层混合土样以及原状土样，其中混合土样测定土壤的颗粒级配和含水率，原状土样测定土壤容重和渗透系数。

表1 采样区的经纬度

功能区	纬度	经度
水上公园	39°5′15.86″	117°10′1.95″
梅江公园	39°2′51.01″	117°12′35.82″
郊区林带	38°59′50.89″	117°9′0.26″
文教区	39°6′24.08″	117°9′59.36″
居民生活区	39°6′10.30″	117°9′11.25″
道路交通区	39°1′57.58″	117°13′31.94″
工业区	39°1′23.19″	117°14′43.05″

2 试验方法与数据处理

2.1 试验方法

依据《土工试验方法标准（GB/T50123-1999）》规范进行测定。土壤颗粒级配分析采用密度计法；土壤含水率测定采用恒温箱烘干法；渗透试验采用变水头试验方法。土壤容重采用环刀法测定。土壤容重是指单位体积土的重量，由土壤孔隙和土壤固体的数量来决定。用来计算土壤的总孔隙度，还可用于估计土壤的松紧和结构状况。土壤孔隙度，通过土壤容重和土粒比重换算得出。是指自然状态下，土壤中孔隙的体积占土壤总体积的百分比。不仅影响土壤的通气状况，而且反映土壤的松紧度和结构状况的优劣。计算公式为：

土壤孔隙度（%）=（1－容重/比重）×100

试验在各个功能区的不同植被类型（草坪和灌木）下，采集具有代表性的3个土样，以减小误差性增加试验可靠性。

2.2 数据处理

采用Excel和SPSS 19.0进行数据处理，运用SPSS 19.0统计每个采样点土壤样品指标的平均值、标准误及标准差，并对土壤性质指标之间进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同功能区草坪与灌木土壤的颗粒组成分析

对采集的土样利用密度计法进行颗粒级配分析，为了更好的对比天津城市不同功能区不同植被类型下每种土壤颗粒级配的差异，每组数据取3个样地的平均值进行对比分析，结果详见表2。由表2可以看出，对于不同植被类型的表层土壤，各个功能区中草坪与灌木的颗粒组成（砂粒、粉粒、黏粒）差异不大，但整体上砂粒表现为：草坪＞灌木，粉粒与黏粒为灌木＞草坪。对于不同功能区的表层土壤，除居民生活区表层土壤属于粉土以外，其他6个功能区表层土壤均

属于粉质黏土。居民生活区土壤颗粒组成中砂粒占了将近 50%,粉粒比重也有 40%多,黏粒占比很小,小于 10%;而公园(水上公园、梅江公园)以及文教区颗粒组成中砂粒为 12%～17%,粉粒为 60%～66%,黏粒为 20%～25%;郊区林带、道路交通区与工业区颗粒组成中砂粒为 7%～12%,粉粒为 68%～75%,黏粒为 15%～22%。这是由于居民生活区选自南开大学居民区属于老居民区,人为侵入体较多,具有明显的富砂性,这与文献[13-14]中对南京以及郑州市不同功能区城市土壤的调查结果一致。同时天津市表层土壤只有个别土壤为砂性,大部分土壤质地较细,这与参考文献[15]对开封市不同利用类型城市土壤的研究发现一致。可见,植被类型(草坪与灌木)对表层土壤的颗粒组成影响不大;不同功能区对表层土壤颗粒组成有影响,天津市表层土壤只有老居民区等个别土壤为粉土,其他大部分土壤为粉质黏土。由于成土母质影响着土壤的质地以及土壤的颗粒组成[16],通过对天津城市不同功能区土壤颗粒组成对比可知土壤的颗粒组成差异不是很大,可以认为土壤自然发育过程主导着土壤颗粒组成。

表 2　天津市不同功能区土壤的颗粒组成分析

种草类型	不同功能区	土的名称	颗粒组成/%					
			砾	砂			粉粒	黏粒
		分类标准	>2 mm	2～0.5 mm	0.5～0.25 mm	0.25～0.075 mm	0.075～0.005 mm	<0.005 mm
草坪	水上公园	粉质黏土			2.8	12.2	64.6	20.4
	梅江公园	粉质黏土			1.7	14.5	63.5	20.3
	郊区林带	粉质黏土			2.0	10.4	68.0	20.2
	文教区	粉质黏土			3.4	11.6	60.5	24.5
	居民生活区	粉土			4.0	42.2	45.0	8.8
	道路交通区	粉质黏土			2.2	8.8	71.2	17.8
	工业区	粉质黏土			1.3	10.2	73.7	14.9
	平均值				2.5	15.7	63.8	18.1
灌木	水上公园	粉质黏土			2.0	11.6	66.4	20.0
	梅江公园	粉质黏土			2.9	9.7	62.2	25.3
	郊区林带	粉质黏土			0.0	7.5	70.3	22.2
	文教区	粉质黏土			3.1	13.1	59.4	24.4
	居民生活区	粉土			3.6	43.4	43.9	9.1
	道路交通区	粉质黏土			2.0	6.0	74.1	18.0
	工业区	粉质黏土			1.9	10.8	70.7	16.6
	平均值				2.6	14.6	63.8	19.4

注:分类标准为 GB 50021—2001(2009 版)。

3.2　不同功能区草坪与灌木土壤含水率分布特征

城市功能区是发挥某种特定城市功能的地域空间,是实现社会经济职能的重要载体,对城市内部环境有着深刻的影响[17]。对天津不同功能区草坪与灌木土壤含水率分布特征进行研究,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,各个功能区之间的土壤含水率存在一定的差别,表现为梅江公园含水率 23.60%最大;其次为郊区林带 21.83%,道路交通区 21.83%和工业区 21.57%;之后为文教区 20.35%和水上公园 20.27%;居民生活区含水率最小为 13.87%。对于植被类型而言(图 1),其中水上公园、居民生活区、道路交通区的草坪土壤含水率>灌木土壤含水率,而梅江公园、郊区林带、文教区以及工业区的灌木土壤含水率高于草坪土壤含水率。但整体上土壤含水率表现为草坪略高于灌木,这是由于草坪低矮紧密,密实性很高,故而蓄水功能强;同时灌木的蒸腾作用大于草坪的蒸腾作用,灌木根系吸收和消耗了土壤中更多的水分,从而使土壤含水率降低[18]。

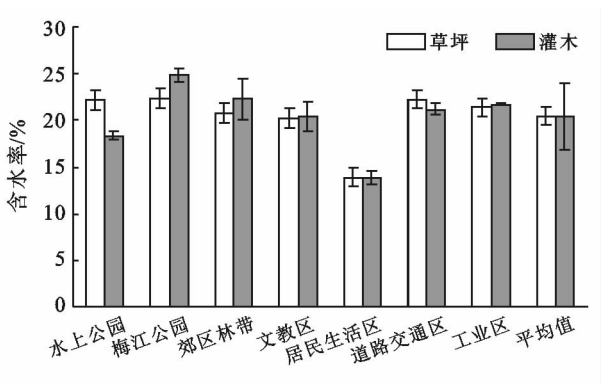


图 1　天津市不同功能区草坪与灌木土壤含水率

3.3 不同功能区草坪与灌木土壤容重的分布特征

土壤容重与孔隙度是土壤基础物理性质指标，直接影响土壤的持水性和透水性，对土壤水源涵养功能具有重要作用[11]，还可用于估计土壤的松紧和结构状况。正常土壤的容重约为 1.3 g/cm^3 左右，但是大部分城市的土壤容重都高于此值[19]。对天津不同功能区草坪和灌木土壤容重进行分析，结果如图 2 所示。由图 2 可以看出，天津草坪与灌木土壤容重的变化范围分别为 1.36～1.50 g/cm^3，1.34～1.55 g/cm^3，均大于 1.3 g/cm^3，这与以往的研究结果一致。说明天津地区土壤压实作用严重，造成土壤容重增大。就不同功能区而言，土壤容重存在一定的差别，在草坪覆盖下，表现为：道路交通区＞梅江公园＞水上公园＞工业区＞文教区＞居民生活区＞郊区林带；灌木覆盖下，为道路交通区＞郊区林带＞水上公园＞梅江公园＞工业区＞文教区＞居民生活区。可以看出，除郊区林带外，其他功能区土壤容重的大小变化趋势与在草坪时的一致，这是由于草坪相对于灌木而言，易受人为活动的影响，而郊区林带由于远离市内，草坪相对于其他功能区受人为干扰较小，从而使土壤容重最小。可见，植被类型对土壤容重影响不大。不同功能区土壤容重总体上呈现：道路交通区＞公园区（水上公园与梅江公园）＞工业区＞文教区＞郊区林带＞居民生活区。表现为道路交通区最大，这是由于土壤容重与人为扰动、人为活动有密切关系，而道路交通区受到庞大的人流、车流所形成的交通环境影响，土壤压实严重导致容重最大；公园区人流量大，使得土壤容重相应的也很大；工业区车辆通行很多、人流量也不少，故而土壤较密实；文教区是学生学习场所，周边环境相对稳定，人流量大并且稳定，日积月累使得土壤压实严重容重变大；郊区林带位于郊区，主要是自然形成，受到的人为扰动较小；居民生活区由于远离工业区和主干道，受到的污染和人为扰动较轻，再加上居民生活区的土质为粉土，所以土壤更加松散，容重最小[12,17]。就植被类型而言（图 2），整体上表现为：草坪土壤容重＜灌木土壤容重，这是由于灌木郁闭度较高，自然土壤扰动较轻，因而土壤容重较草坪大；同时植物的根系也会影响土壤的容重，这是由于根系在土壤中穿插会占据土壤中的孔隙，同时导致土壤颗粒移动和结构变化，从而导致土体的物理性质发生改变，进而影响土壤的容重、孔隙特征和水（养）分运移[20]。而此次采集的土壤为 0—30 cm 的表层土壤，同时草坪根系主要分布在 0—20 cm[21]，且低矮紧密，因而采集的草坪土壤会夹杂有少量根系，使得土壤孔隙度较灌木大，容重较灌木小。但对于公园区（水上公园、梅江公园）、居民区以及工业区的草坪土壤容重却高于灌木土壤容重，这是由于这三种功能区主要是人为活动聚集区，草坪受到人为践踏相对于其他功能区比较严重，所以草坪土壤容重要高于灌木土壤容重。

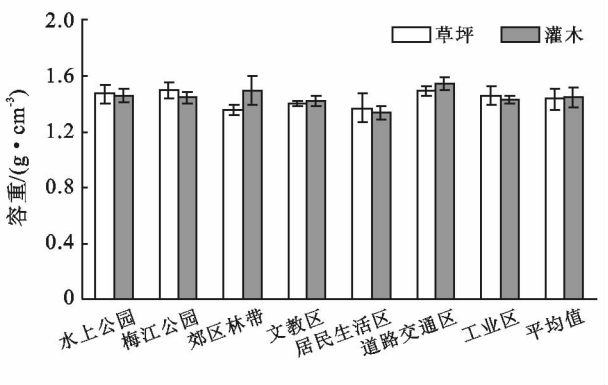


图 2 天津市不同功能区草坪与灌木土壤容重特征

3.4 不同功能区草坪与灌木土壤孔隙度分布特征

土壤孔隙度与土壤容重具有相反的特征。土壤压实越严重，容重越大，孔隙度越小[22]。一般用土壤容重和孔隙度来反映土壤的压实程度[23]。图 3 为不同功能区草坪与灌木土壤孔隙度的分布特征。由图 3 可以看出，土壤孔隙度总体为 42.50%～52.80%，其中居民生活区 49.67% 最大，其次为郊区林带 48.00%，文教区 47.92%，工业区 46.88%，水上公园 45.91%，梅江公园 45.58%，道路交通区最小为 44.98%。就植被类型而言，其中公园区、居民区与工业区的草坪土壤孔隙度略小于灌木土壤孔隙度，而郊区林带、文教区以及道路交通区的草坪土壤孔隙度大于灌木土壤孔隙度，但总体上土壤孔隙度表现为：草坪＞灌木，与土壤容重正好呈现相反的变化趋势，出现这种规律的原因与土壤容重的原因相同也主要是由于人为干扰、植物根系的作用。

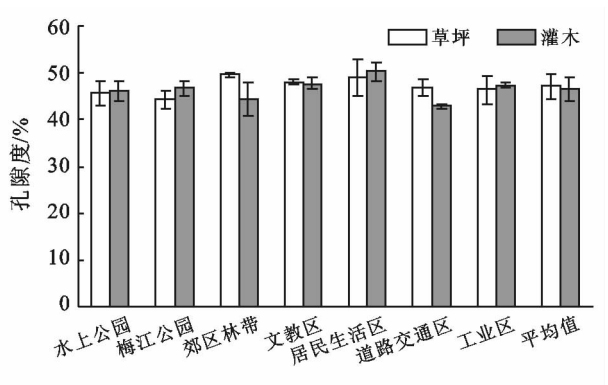


图 3 天津市不同功能区草坪与灌木土壤孔隙度

3.5　不同功能区草坪和灌木的土壤渗透系数

土壤渗透系数是综合反映土体渗透能力的一个指标,影响土壤渗透系数大小的因素很多,主要取决于土体颗粒的形状、大小、不均匀系数和水的粘滞性等。土壤渗透系数是土壤渗透性能的主要表征指标,而土壤渗透性能与土壤质地、孔隙度、土壤湿度有关[12,24-25]。同时土壤的地形状况以及土地利用方式等也会影响土壤的渗透能力[26]。对天津不同功能区的草坪和灌木土壤渗透系数进行分析,结果如图 4 所示。

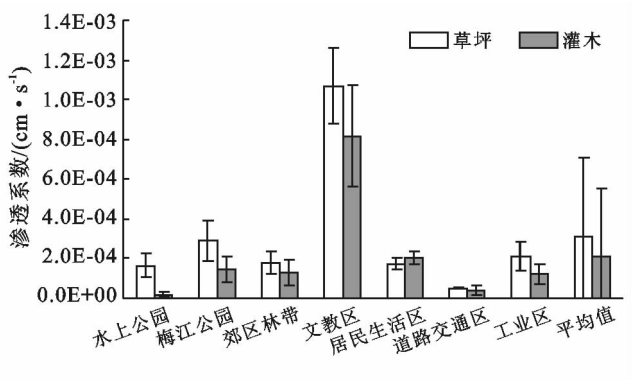


图 4　不同功能区草坪与灌木的土壤渗透系数特征

由图 4 可以看出,不同功能区的草坪和灌木土壤渗透系数差异很大,少数最大可达 10^{-3} cm/s 数量级,最小的为 10^{-6} cm/s 数量级,而且在同一功能区内,土壤渗透系数也波动很大。就植被类型而言,草坪土壤渗透系数>灌木土壤渗透系数,这与土壤的孔隙度特征一致,与土壤密度特征相反。就不同功能区而言,以文教区土壤渗透系数 9.5E−04 cm/s 最大,这是由于取样地有种植蔬菜,而土壤耕种会翻新,松化土壤结构,使得土壤孔隙度大,渗透系数大;其次梅江公园土壤渗透系数为 2.1E−04 cm/s;居民生活区土壤渗透系数为 2.0E−04 cm/s,这是由于居民生活区土质为粉土,故而渗透系数较大;工业区土壤渗透系数为 1.8E−04 cm/s;郊区林带土壤渗透系数为 1.6E−04 cm/s;水上公园土壤渗透系数为 9.4E−05 cm/s,这是由于水上公园人流量大,人为干扰大,使得土壤密实较其他功能区严重,导致渗透系数小;道路交通区土壤渗透系数最小为 5.1E−05 cm/s,这是由于道路交通区受到庞大人流、车流的影响,造成土壤容重大,渗透系数小。总体趋势表现为:文教区>居民生活区>工业区>郊区林带>公园区>道路交通区,大小趋势主要是受人为因素的影响,包括人为踩踏、喷灌、种植、耕作等[12,23,27]。

对于渗透性的分级,依据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287-99)中岩土体渗透性的分级标准,对天津市草坪和灌木土壤的渗透系数进行分类(表 3)。由表 3 可知,天津仅有 4.76%的草坪土壤属于微透水情况,其他草坪与灌木土壤均属于弱透水和中等透水。可见,天津草坪与灌木土壤以弱透水和中等透水为主。因此,后续进行下凹式绿地设计时应该考虑天津土壤的渗透性能,有必要时对土壤进行改良,以便更好地渗蓄雨水。

表 3　天津市草坪和灌木土壤渗透系数频率分布

渗透性分级	渗透系数/(cm·s⁻¹)	频率/%	
		草坪	灌木
极微透水	$K<10^{-6}$	0	0
微透水	$10^{-6}\leqslant K<10^{-5}$	4.76	0
弱透水	$10^{-5}\leqslant K<10^{-4}$	33.33	38.09
中等透水	$10^{-4}\leqslant K<10^{-2}$	61.91	61.91
强透水	$10^{-2}\leqslant K<1$	0	0
极强透水	$K\geqslant 1$	0	0

3.6　土壤性质间的相关性分析

3.6.1　土壤渗透系数与土壤物理性质之间的相关性分析　运用 Pearson 相关系数法对天津土壤渗透系数与其物理性质的相关性进行分析,结果详见表 4。从表 4 可知,天津土壤的渗透系数与土壤含水率、土壤容重呈负相关性,与土壤孔隙度呈正相关性。这是由于土壤含水率高将使土壤入渗通量减小,从而使土壤渗透系数变小[19];而土壤容重是通过影响土壤孔隙度来影响土壤渗透系数的,土壤容重越大将使孔隙度变小,从而使土壤渗透性变弱,同时土壤容重越小使得孔隙度越大,渗透性越强[12,28]。土壤渗透系数与土壤颗粒组成的砂粒和黏粒呈正相关,与粉粒呈负相关。相关性结果与檀海洋[12]对淮南市不同功能区城市土壤入渗性能与土壤物理性质的相关性分析结果一致。

表 4　土壤渗透系数与土壤物理性质相关性分析

项 目	含水率	容重	孔隙度	砂粒	粉粒	黏粒
土壤渗透系数	−0.042	−0.319	0.338	0.012	−0.264	0.457

3.6.2　土壤物理性质间的相关性分析　对天津土壤含水率、土壤容重、土壤孔隙度以及颗粒组成(砂粒、粉粒、黏粒)相互之间的相关性进行分析,结果详见表 5。从表 5 可以得出,土壤含水率与粉粒、黏粒呈显著

正相关;与砂粒呈极显著负相关,与孔隙度呈显著负相关。土壤容重与土壤孔隙度的相关性特别好为 $r=-0.993(|r|>0.(9)$,呈现极显著负相关关系,这与以往的研究结果一致,这是由于土壤容重越大,土壤越紧实粘重,孔隙越差;土壤容重越小,土壤越松散,孔隙越好[23]。

表 5 土壤物理性质的相关性分析

项 目	饱和含水率	容重	孔隙度	砂粒	粉粒	黏粒
含水率	1	0.726	−0.762*	−0.935**	0.840*	0.772*
密 度	0.726	1	−0.993**	0.719	0.732	0.430
孔隙度	−0.762*	−0.993**	1	0.722	−0.720	−0.461

注:"*"表示在 0.05 水平上显著相关;"**"表示在 0.01 水平上显著相关。

4 结 论

(1) 天津市不同功能区对表层土壤颗粒组成有影响,除老居民生活区属于粉土外,其他功能区均属于粉质黏土;不同植被类型(草坪与灌木)对表层土壤的颗粒组成影响不大,整体上砂粒表现为:草坪>灌木,粉粒与黏粒表现为:灌木>草坪。

(2) 天津市不同功能区土壤含水率为梅江公园最大,其次为郊区林带、道路交通区以及工业区,之后为文教区与水上公园,居民生活区最小;不同植被类型土壤含水率表现为:草坪>灌木。

(3) 土壤容重与人为扰动有密切关系,数值均大于 1.3 g/cm^3,说明天津土壤压实严重,表现为:道路交通区>公园区>工业区>文教区>郊区林带>居民生活区;其中,草坪土壤密度<灌木土壤密度。

(4) 土壤孔隙度与土壤容重具有相反的特征,总体为 42.50%~52.80%,且草坪土壤孔隙度>灌木。

(5) 各个功能区间的渗透系数差异很大,变化范围为 8.8E−06~1.3E−03 cm/s,大小趋势主要是受人为因素的影响,表现为:文教区>居民生活区>工业区>郊区林带>公园>道路交通区。就植被类型而言,草坪土壤渗透系数>灌木土壤渗透系数,这与土壤的孔隙度特征一致,与土壤容重特征相反。天津草坪与灌木土壤以弱透水和中等透水为主。因此,后续进行下凹式绿地设计时应该考虑天津土壤的渗透性能,有必要时对土壤进行改良,以便更好的渗蓄雨水。

(6) 天津市土壤的渗透系数与土壤含水率、土壤容重呈负相关性,与土壤孔隙度呈正相关性;土壤容重与土壤孔隙度呈现极显著负相关;土壤孔隙度与土壤含水率呈显著负相关。

[参 考 文 献]

[1] 裔士刚,王祥勇,康威,等. 改良型下凹绿地对小区雨水径流的调蓄净化效能[J]. 中国给水排水 2017,33(5):134-138.

[2] Liu Dong. Collection and utilization of rainwater in water-saving green space [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012,16(32):155-163.

[3] 张建林. 下凹式绿地蓄渗城市路面雨水的试验研究[D]. 云南 昆明:昆明理工大学,2007.

[4] 廖金凤. 城市化对土壤环境的影响[J]. 生态科学,2001,20(1/2):91-95.

[5] 孟好军,刘贤德,金铭,等. 祁连山不同森林植被类型对土壤微生物影响的研究[J]. 土壤通报,2007,38(6):1128-1130.

[6] 肖列,刘国彬,薛萐,等. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤水分及地上生物量的影响[J]. 水土保持通报,2016,36(4):204-215.

[7] 周其文,师荣光,韩允垒,等. 天津市郊不同利用方式农田土壤镉的累积特征及生态风险评估[J]. 中国农学通报,2014,30(36):182-187.

[8] 白秀玲,马建华,孙艳丽,等. 开封城市土壤磷素组成特征及流失风险[J]. 环境科学,2017,11:1-11.

[9] Krauss M, Wilcke W. Poly chlorinated naphthalenes in urban soils: Analysis, concentrations, and relation to other persistent organic pollutants[J]. Environmental Pollution, 2003,122(1):75-89.

[10] 刘汗,雷廷武,赵军. 土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J]. 中国水土保持科学,2009,7(2):1-6.

[11] 刘艳丽,李成亮,高明秀,等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报,2015,35(15):5183-5190.

[12] 檀海洋. 不同功能区城市土壤理化性质及入渗特性研究:以淮南市田家庵区、大通区为例[D]. 安徽 合肥:安徽理工大学,2015.

[13] 吴新民,潘根兴,姜海洋,等. 南京城市土壤的特性与重金属污染的研究[J]. 生态环境,2003,12(1):19-23.

[14] 李立平,邢维序,刘肌. 郑州市城市土壤理化性质[J]. 城市环境与城市生态,2010,23(2):18-22.

[15] 马建华,张丽,李亚丽. 开封市城区土壤性质与污染的初步研究[J]. 土壤通报,1999,30(2):93-96.

[16] 熊毅,李庆逵. 中国土壤[M]. 2 版. 北京:科学出版社,1990:327-333.

(下转第 344 页)

那奴村、赵家村、水家村等灌溉条件较好、农业面积产值高的川区村域，社会效益高效区则多分布在红庄村、魏家咀村等人少地多的山区村域或人口多、粮食播种面积少的川区边缘村域。

(3) 在耕地利用效益的时空演化方面，总体上表现为正的空间自相关特征，耕地利用效益的时空演变可分为两个阶段：2006—2011 年各村之间的相互作用在逐渐增强，2011 年 Moran's I 指数达 0.601 2，局部上 H-H 类型区的行政村数量增加，主要集中在头家村、石那奴村等川区村域；2011—2015 年 Moran's I 指数下降了 81.87%，村际间的相互作用减小；H-H 效益区逐渐向广河县西南方的村域转移。

[参 考 文 献]

[1] 牛海鹏，张安录. 耕地利用效益体系与耕地保护的经济补偿机制重构[J]. 农业现代化研究，2009，30(2)：165-167.

[2] 李裕瑞，刘彦随，龙花楼. 黄淮海典型地区村域转型发展的特征与机理[J]. 地理学报，2012，67(6)：771-782.

[3] 龙花楼. 中国乡村转型发展与土地利用[M]. 北京：科学出版社，2012.

[4] 宋戈，梁海鸥. 黑龙江省垦区耕地利用综合效益评价及驱动力分析[J]. 经济地理，2011，30(5)：835-840.

[5] 聂学海，宋戈，王蓓，等. 内蒙古自治区耕地利用效益时空特征分析[J]. 江苏农业科学，2017，45(4)：206-211.

[6] 聂艳，乌云嘎，于婧，等. 基于能值分析的武穴市耕地利用效益时空特征分析[J]. 长江流域资源与环境，2015，24(6)：987-993.

[7] Victor D G. Recovering sustainable development[J]. Foreign Affairs，2006，85(1)：91-103.

[8] 王建庆，冯秀丽. 浙江省耕地利用效益及其空间差异性[J]. 浙江农业科学，2013(10)：1338-1342.

[9] 广河县统计局. 广河县统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2007-2015.

[10] 张文雅，宋戈. 哈尔滨市耕地利用效益特征分析[J]. 水土保持研究，2009，16(6)：79-83.

[11] 刘琼峰，李明德，段建南，等. 基于 GIS 的湖南省耕地利用效益时空变异研究[J]. 经济地理，2013，33(9)：142-147.

[12] 李穗浓. 基于城镇化视角的乡村土地利用效益评价及调控机制研究：以广州市白云区 118 个行政村为例[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2015.

[13] 牛海鹏，张安录. 耕地利用效益体系重构及其外部性分析[J]. 中国土地科学，2009，23(9)：25-29.

[14] 张荣天，焦华富. 泛长三角城市土地利用效益测度及时空格局演化[J]. 地理与地理信息科学，2015，30(6)：75-81.

[15] 杨宇，刘毅. 基于 DEA-ESDA 的中国省际能源效率及其时空分异研究[J]. 自然资源学报，2015，29(11)：1815-1825.

[16] 李穗浓，白中科. 城镇化地区乡村土地利用效益评价研究[J]. 广东社会科学，2015(6)：47-53.

[17] 张荣天，焦华富. 中国省际耕地利用效率时空格局分异与机制分析[J]. 农业工程学报，2015，31(2)：277-287.

[18] 陶晓明. 耕地集约利用时空格局演变特征及障碍机制研究[D]. 四川 成都：四川师范大学，2016.

(上接第 336 页)

[17] 申绍华，余明，吕敏. 漳州市不同功能区绿地土壤有机质分布特征研究[J]. 牡丹江师范学院学报：自然科学版，2013(1)：25-27.

[18] 张如龙，王延荣，籍永超. 张掖城市湿地土壤含水量特征[J]. 甘肃农业，2010，9(6)：19-20.

[19] 杨金玲，张甘霖，袁大刚. 南京市城市土壤水分入渗特征[J]. 应用生态学报，2008，19(2)：363-368.

[20] 胡林. 根系对土壤机械压力影响的试验研究[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学，2011.

[21] 成文竞，崔建宇，闵凡华，等. 三种草坪草的根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 草业学报，2009，18(1)：179-183.

[22] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京：农业出版社，1992：261.

[23] 杨金玲，张甘霖. 城市功能区、植被类型和利用年限对土壤压实的影响[J]. 土壤，2007，39(2)：263-269.

[24] 黄进，张金池，陶宝先. 江宁小流域主要森林类型水源涵养功能研究[J]. 水土保持学报，2009，23(1)：182-186.

[25] 王勤，张宗应，徐小牛. 安徽大别山库区不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报，2003，17(3)：59-62.

[26] 刘芝芹，黄新会，王克勤. 金沙江干热河谷不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报，2014，28(2)：57-62.

[27] 崔文采. 土壤形成的人为因素[J]. 干旱区地理，1986，9(1)：27-31.

[28] 席彩云，余新晓，徐娟，等. 北京密云山区典型林地土壤入渗特性[J]. 北京业大学学报，2009，31(5)：42-47.