

甘肃省不同气候类型区土壤水分特性

杨 阳¹, 马绎皓², 赵 鸿¹, 齐 月¹, 张 凯¹, 王鹤龄¹

(1.中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,
中国气象局干旱变化与减灾重点开放实验室,兰州 730030;2.兰州中心气象台 兰州 730200)

摘要: 为揭示甘肃省不同气候区不同质地土壤的容重、田间持水量和凋萎湿度的差异,对观测资料的适用性和推广价值进行评价。通过对 77 个站点 10—100 cm 土壤水分资料的分析,结果表明:甘肃省全省的土壤容重范围为 0.89~1.79 g/cm³,平均值为 1.36 g/cm³,表层土壤容重与深层土壤容重差异显著($P<0.05$),半湿润区、半干旱区浅层土壤容重更易受到外界环境及人为活动的干扰。甘肃省大部田间持水量由西北向东南呈增加趋势,田间持水量的最大值为 36%~40%,分布在高寒湿润区 10—50 cm 土层,全省 10 cm 与 20 cm 土层田间持水量差异较小,相关系数为 0.96,与其他层次差异较大,50 cm 土层很可能是甘肃地区土壤田间持水量的分界层。各土层凋萎湿度最大值均出现在冷温带干旱区、高寒半干旱半湿润区中部,不同层次间田间持水量与凋萎湿度呈极显著相关。甘肃省全省大部分地区主要以壤土为主,除此之外干旱区主要以砂壤土为主,半干旱区主要以砂壤土与黏壤土为主,半湿润区主要以粉壤土与黏壤土为主。探讨不同气候区不同层次间土壤容重、田间持水量和凋萎湿度的差异,以为保障地上生产力、提高水分利用效率提供数据支撑。

关键词: 甘肃; 土壤容重; 田间持水量; 凋萎湿度

中图分类号: S164 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)05-0213-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.029

Soil Moisture Properties of Different Climate Types in Gansu Province

YANG Yang¹, MA Yihao², ZHAO Hong¹, QI Yue¹, ZHANG Kai¹, WANG Heling¹

(1.Lanzhou Institute of Arid Meteorological, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730030; 2. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730200)

Abstract: Through the analysis of soil moisture data at 77 sites in Gansu Province from 10 to 100 cm, the purpose of this study was to reveal the differences in soil bulk density, field water capacity, and wilting point under different soil textures in different climate regions, and to evaluate the applicability and promotion of the observed data. The results showed that the soil bulk densities ranged from 0.89 to 1.79 g/cm³, with an average of 1.36 g/cm³. There was a significant difference between the bulk density of top soil and deep soil. The bulk densities of shallow soils in semi-humid areas and semi-arid areas were more likely to be disturbed by the external environment and human activities. The field water holding capacity in most area was increasing from northwest to southeast, with the maximum of 36%~40% in the 10—50 cm soil layer in the alpine humid area. The difference in field water holding capacity between 10 and 20 cm soil layers was small, with a correlation coefficient (0.96), which was quite different from other layers, the 50 cm soil layer was likely to be the boundary layer of soil field water holding capacity. The maximum wilting point of each soil layer appeared in the arid area of the cold temperate zone and the middle of the alpine semi-arid and semi-humid area. The field water holding capacity and the wilting point of different layers were extremely significantly correlated. Most parts of Gansu Province are mainly loam, in addition, the arid area is mainly sandy loam soil, the semi-arid area is dominated by sandy loam and clay loam, and the semi-humid area by silt loam and clay loam.

Keywords: Gansu; soil bulk density; field water capacity; wilting point

收稿日期:2021-03-19
资助项目:国家自然科学基金项目(41975151);干旱气象科学研究基金项目(IAM201912);中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放基金项目(CAMF-201801);甘肃省气象局气象科研人才专项(GSMARc2019-07)
第一作者:杨阳(1992—),女,硕士,研究实习员,主要从事应用气象研究。E-mail:yanggy120300@163.com
通信作者:赵鸿(1977—),女,博士,研究员,主要从事农业生态与气候变化研究。E-mail:zhaohonglt@126.com

土壤容重是重要的土壤物理性质之一,与土壤、农业生态系统密切相关,对土壤的热、水力和力学性能具有重要影响^[1-2]。土壤压实也是一个主要的农业问题,对生产力具有重要影响^[3]。田间持水量常被用来衡量土壤的保水性能,对农业生产及农田灌溉等具有指导意义^[4-5],而萎蔫湿度是土壤有效水分和无效水分的分界点,是土壤所能保持的最大有效性能^[6]。土壤容重被视为与土壤紧实度以及土壤的许多物理、化学和生物学特性相关的关键因素^[7]。目前国内外学者对土壤容重、田间持水量和凋萎湿度都进行了大量研究,Li 等^[8]研究发现,40 cm 以上土壤容重的空间变异性受结构和随机因素的影响,而 40 cm 以下土壤容重受结构因素主导(土壤属性),土壤有机质是影响各层土壤容重空间变异性的控制因素;宋丽等^[9]研究发现,太原市公园绿地表层土壤容重与深层土壤容重存在极显著差异,且该地区土壤容重偏大,不易于植物生长,需进行一定的改进;田皓等^[10]研究发现,土壤水分较少时空气偏多,沙土类植物的蓄水保肥能力差,致使植物凋萎湿度小,而壤土的通透性较好,凋萎湿度适中,适宜作物生长。基于土壤容重对土壤管理、土壤肥力质量高低及植物生长生产的影响,田间持水量及凋萎湿度对保水育肥、旱情分析的重要性,研究土壤容重、田间持水量和凋萎湿度对合理利用土地、阐明土壤生产力、指导土壤墒情和判断土壤干旱程度具有重要的实际意义。

甘肃省地处内陆,由于其独特的地形,大部分地区气候较为干燥^[11],年降水量自东南向西北递减,尤其自 20 世纪 90 年代,干旱事件频发,严重影响甘肃地区粮食生产植物生长。通过分析土壤容重及土壤的持水性能(田间持水量)和有效性能(萎蔫湿度),可为合理利用土地、保障粮食安全提供重要支撑。目前已有的研究多集中在 0—40 cm 土层,对于大范围较深层土壤容重、田间持水量和凋萎湿度的研究较少,因此本文根据大量的实测资料(通过采用甘肃省 77 个气象站点 10—100 cm 土壤容重、田间持水量和凋萎湿度资料),分析探讨甘肃省各地区水分性质及全省观测站的土壤水分变化,阐明甘肃省各地区土壤容重、田间持水量和凋萎湿度的基本特征和规律,了解不同气候类型区土壤水分情况,探讨不同气候区不同层次间土壤容重、田间持水量和凋萎湿度的差异,以期为保障地上生产力、提高水分利用效率提供数据支撑。

1 材料与方法

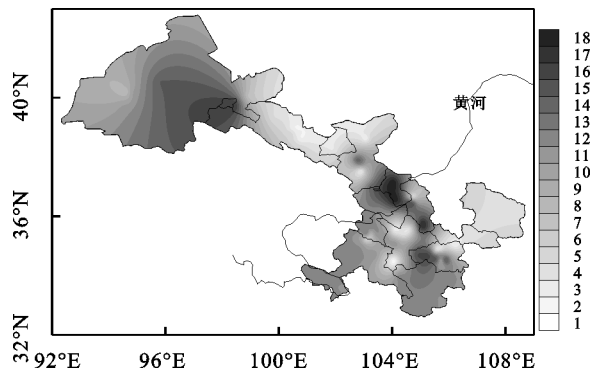
1.1 研究区概况

甘肃省地处黄河中上游地区,位于西北内陆,占地 45.37 万 km²,共 12 个地级市,2 个自治州。因其

地形狭长,大部分地区的气候较为干燥,属明显的温带大陆性季风气候,早晚温差大,日照充足,全年降水量为 36.6~734.9 mm,多集中在 6—8 月且自东南向西北递减。以日平均气温稳定通过 10℃ 的活动积温及其初终日间的日数和 1 月平均气温作为划分气候带的指标,将全省分为 8 个气候区,主要是陇南南部北亚热带半湿润区、陇南北部暖温带湿润区、陇中南部冷温带半湿润区、陇中北部冷温带半干旱区、河西走廊冷温带干旱区、河西西部暖温带干旱区、祁连山高寒带半干旱半湿润区、甘南高寒带湿润区。主要的粮食作物为小麦、玉米、马铃薯,经济作物为棉花、油料。

1.2 资料来源

为全面掌握甘肃省土壤水分性质,本文利用甘肃省 77 个气象观测站 2019 年固定观测地段 10—100 cm 深度的土壤水分常数(土壤容重、田间持水量及凋萎湿度)资料,监测点地上植被农地 41 个站点,草地 28 个站点,自然植被 5 个站点,无作物 3 个站点(图 1),测定时间在 6—10 月,观测区域遍布全省大部地区,基本可以反映全省土壤墒情情况。



注:图中 1 为作物,2 为麦地,3 为大麦,4 为玉米,5 为油菜,6 为马铃薯,7 为棉花,8 为果树,9 为葡萄,10 为草甸,11 为草地,12 为菜地,13 为牧草,14 为野草,15 为自然植被,16 为粮食作物,17 为玉米、小麦、油菜间作,18 为无。

图 1 甘肃省地表覆盖作物区划

1.3 研究方法

根据甘肃省全省观测站点土壤质地的实际情况,全省土壤质地主要为壤土及砂壤土,其次为黏壤土、粉壤土、面砂土、粉黏土和粉土。依据土壤质地及研究区域气候的不同,采用 Excel 和 DPS 软件进行制图及统计分析,通过 Surfer 软件绘制空间分布图,同时采用单因素方差分析和新复极差法(Duncan 法)进行多重比较。

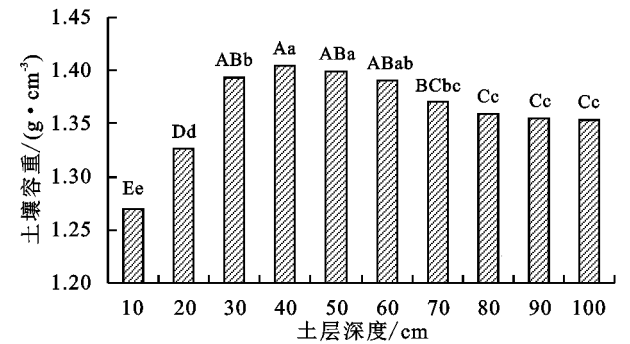
2 结果与分析

2.1 甘肃省各测站土壤容重的变化

土壤容重是反映土体密度和孔隙度的一个简明指标,对土壤水分的保持和运行产生一定影响,其中

土壤质地是影响土壤水分性质的主要因素,本研究通过不同气候类型区、不同土壤质地探究各地区土壤容重的变化情况。

2.1.1 甘肃省各测站土壤容重特征分析 我国土壤容重主要分为6级,分别为过松(土壤容重<1.00 g/cm³)、适宜(1.00≤土壤容重<1.25 g/cm³)、偏紧(1.25≤土壤容重<1.35 g/cm³)、紧实(1.35≤土壤容重<1.45 g/cm³)、过紧实(1.45≤土壤容重<1.55 g/cm³)和坚实(土壤容重≥1.55 g/cm³)^[9],一般在1.10~1.30 g/cm³的范围内最适宜植物生长^[12]。甘肃省土壤容重范围为0.89~1.79 g/cm³,平均容重为1.36 g/cm³,可以看出甘肃省全省的土壤容重属于紧实级别,总体来说,需要一定的改良才能达到作物适宜生长的范围。对全省不同层次土壤容重进行平均值计算(图2),最小值在10 cm 土层(1.27 g/cm³),最大值在40 cm 土层(1.40 g/cm³),随着土层深度增加,全省土壤容重先增加后降低,10,20 cm 土层与其他层次的土层差异达到极显著水平($P<0.01$),30 cm 土层与40—50 cm 土层差异显著($P<0.05$),与80—100 cm 土层差异极显著($P<0.01$),可以看出表层的土壤容重与深层土壤容重差异较大,土层越深,容重差异越大。



注:图柱上方不同的小写字母表示通过 $P<0.05$ 的 Duncan 检验;不同大写字母表示通过 $P<0.01$ 的 Duncan 检验。

图2 甘肃省土壤容重平均值

2.1.2 甘肃省不同气候类型区土壤容重特征 甘肃省土壤容重按不同气候类型区进行划分,由于亚热带半湿润区、暖温带干旱区、高寒带半干旱半湿润区及高寒带湿润区站点分布较为稀疏,因此选取站点分布较多的4个气候类型区进行分析,分别为暖温带湿润区9个样点、冷温带半湿润区27个样点、冷温带半干旱区15个样点和冷温带干旱区11个样点。由表1可知,同一气候区不同层次之间土壤容重存在很大的差异,半湿润区10 cm 与30—50 cm 土层土壤容重差异显著($P<0.05$),半干旱区10 cm 与50—70 cm 土层土壤容重差异显著($P<0.05$),湿润区与干旱区不同层次之间土壤容重差异不显著($P>0.05$);从平均土壤容重来看,干旱区土壤容重最大(1.49 g/cm³),

半干旱区最小(1.31 g/cm³)。随着土层深度增加,半湿润区与半干旱区土壤容重呈先增加后降低的趋势,湿润区和干旱区呈波动的变化趋势,4个区域土壤容重最大值均出现在40—50 cm,最小值在10—20 cm,可见各区域表层土壤均较为松弛。

从不同区域同一层次的土壤容重来看,干旱区与半湿润区、半干旱区10—50,80—100 cm 土层差异显著,不同层次土壤容重最大值均出现在干旱区。湿润区与半湿润区、半干旱区10,50 cm 土层差异显著,湿润区与半湿润区20 cm 土层差异显著,与半干旱区30—40 cm 土层差异显著,不同层次土壤容重最大值均出现在湿润区。从各个区域土壤紧实度来看,半干旱区与半湿润区属于偏紧级别,稍加措施或合理利用就可满足植物的生长要求,而湿润区属于紧实级别,干旱区属于过紧实级别,对植物的生长具有很大的影响,需要选取较为适宜的植物种植。

表1 甘肃省不同气候区域土壤容重

单位:g/cm ³				
土层深度/cm	湿润区	半湿润区	半干旱区	干旱区
10	1.36±0.11Aa	1.21±0.13Bb	1.21±0.11Bb	1.42±0.11Aa
20	1.39±0.12Aab	1.26±0.14ABc	1.28±0.12ABbc	1.47±0.09Aa
30	1.47±0.22Aab	1.36±0.14ABc	1.31±0.10ABc	1.53±0.11Aa
40	1.50±0.15Aab	1.38±0.14ABc	1.31±0.11ABc	1.54±0.14Aa
50	1.51±0.16Aa	1.35±0.12Ab	1.35±0.11Ab	1.51±0.12Aa
60	1.48±0.19Aa	1.34±0.13ABa	1.36±0.14Aa	1.49±0.10Aa
70	1.45±0.16Aab	1.32±0.12ABb	1.34±0.12Aab	1.49±0.11Aa
80	1.42±0.19Aab	1.31±0.12ABb	1.33±0.10ABb	1.50±0.12Aa
90	1.43±0.19Aab	1.31±0.13ABb	1.32±0.10ABb	1.48±0.08Aa
100	1.43±0.14Aab	1.31±0.13ABb	1.28±0.11ABb	1.50±0.09Aa
平均值	1.44±0.05	1.32±0.05	1.31±0.04	1.49±0.03

注:同行不同小写字母表示同一土层不同区域土壤容重通过 $P<0.05$ 的 Duncan 检验;同列不同大写字母表示同一区域不同土层土壤容重通过 $P<0.05$ 的 Duncan 检验。

2.1.3 甘肃省不同土壤质地土壤容重特征 不同质地土壤水分在垂直方向上的变化可以反映土壤水分的稳定特征及对土壤水分的消耗情况^[13]。全省土壤容重按不同土壤质地进行划分,选取其中主要的7种土壤质地进行分析,分别为壤土27个样点,砂壤土18个样点,黏壤土8个样点,粉壤土10个样点,面砂土3个样点,粉黏土3个样点,粉土4个样点。土壤容重在不同土壤质地不同层次存在明显差异(表2),粉壤土10 cm 与30—50 cm 土层存在显著差异,面砂土10 cm 与30,50 cm 土层存在显著差异,粉黏土10 cm 与30 cm 土层存在显著差异,粉土10 cm 与30—40 cm 土层存在显著差异;从平均土壤容重来看,面砂土土壤容重最小(1.27 g/cm³),砂壤土土壤容重最大(1.44 g/cm³),其中砂壤土土壤容重的最大值出现在60—90 cm 土层,其他质地土壤容重的最大值主要

在 30—50 cm 土层,除粉黏土外其他质地土壤容重的最小值均出现在 10 cm 土层。各质地的土壤容重随土层深度的增加表现出不同的变化趋势,壤土、面砂土、粉黏土呈增加—降低—增加的变化趋势,砂壤土、粉土呈增加—降低的变化趋势,黏壤土、粉壤土呈波动的变化趋势。

同一土层不同土壤质地的容重也存在很大差异,40 cm 土层面砂土与粉土土壤容重存在显著性差异,70—90 cm 土层砂壤土与面砂土土壤容重存在显著性差异,其他层次土壤容重差异性不显著。从土壤的紧实度来看,黏壤土、粉壤土、面砂土属于偏紧级别,壤土、砂壤土、粉黏土、粉土属于紧实级别。

表 2 甘肃省不同土壤类型土壤容重

单位:g/cm³

土层深度/cm	壤土	砂壤土	黏壤土	粉壤土	面砂土	粉黏土	粉土
10	1.27±0.13Aa	1.32±0.18Aa	1.23±0.13Aa	1.22±0.15Ba	1.18±0.06Ba	1.33±0.05Ba	1.27±0.08Ca
20	1.32±0.13Aa	1.38±0.18Aa	1.26±0.11Aa	1.29±0.14ABa	1.28±0.02ABa	1.40±0.07ABa	1.32±0.05BCa
30	1.38±0.18Aa	1.44±0.18Aa	1.33±0.12Aa	1.39±0.15Aa	1.35±0.12Aa	1.47±0.09Aa	1.42±0.08ABa
40	1.39±0.16Aab	1.44±0.18Aab	1.34±0.13Aab	1.44±0.14Aab	1.26±0.15ABb	1.43±0.13ABab	1.47±0.10Aa
50	1.40±0.16Aa	1.45±0.13Aa	1.34±0.14Aa	1.41±0.12Aa	1.33±0.15Aa	1.36±0.08ABa	1.38±0.09ABCa
60	1.39±0.17Aa	1.47±0.12Aa	1.34±0.18Aa	1.39±0.13ABa	1.28±0.09ABa	1.34±0.04ABa	1.39±0.07ABCa
70	1.36±0.15Aab	1.47±0.12Aa	1.34±0.19Aab	1.34±0.10ABab	1.25±0.03ABb	1.31±0.08Bab	1.38±0.10ABCa
80	1.35±0.15Aab	1.48±0.11Aa	1.34±0.19Aab	1.32±0.09ABab	1.22±0.04ABb	1.32±0.07Bab	1.31±0.11BCab
90	1.35±0.16Aab	1.46±0.09Aa	1.34±0.19Aab	1.33±0.10ABab	1.22±0.01ABb	1.36±0.09ABab	1.30±0.08BCab
100	1.35±0.17Aa	1.46±0.13Aa	1.31±0.18Aa	1.32±0.11ABa	1.28±0.05ABa	1.39±0.09ABa	1.28±0.05Ca
平均值	1.36±0.04	1.44±0.05	1.32±0.04	1.35±0.06	1.27±0.05	1.37±0.05	1.35±0.07

注:同行不同小写字母表示同一土层不同质地土壤容重通过 $P<0.05$ 的 Duncan 检验;同列不同大写字母表示同一质地不同土层土壤容重通过 $P<0.05$ 的 Duncan 检验。

2.2 甘肃省田间持水量的变化

根据甘肃省 77 个站点的田间持水量绘制了甘肃省田间持水量的分布图,由图 3 可知,以 4% 的线距划分 8 个区域,同时选择 8 个不同土层深度(10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 cm)的田间持水量进行分析,10—50 cm 土层田间持水量最大值出现在高寒湿润区,60—100 cm 土层田间持水量最大值出现在陇中冷温带半干旱区。不同气候区不同土层田间持水量存在明显差异,河西冷温带、暖温带干旱区及祁连山高寒半干旱半湿润区不同土层之间田间持水量的差异较小,高值区在祁连山高寒半干旱半湿润区的中部民乐站(20%~24%);陇中冷温带半干旱区的田间持水量随土层深度增加呈增加趋势,高值区在景泰站(32%~36%);高寒湿润区各土层深度的田间持水量变化较大,10—50 cm 土层的田间持水量较高(36%~40%),而 60—100 cm 土层的土壤含水量明显降低;陇中冷温带半湿润区、陇南暖温带湿润区及亚热带半湿润区各土层田间持水量呈波动的变化趋势,10—20 cm 土层的田间持水量最高(24%~32%)。

通过对 10—100 cm 土层土壤田间持水量的相关性分析可以看出,10 与 20—100 cm 土层田间持水量的相关性越来越差,除去 10—20 cm 土层,表 3 中第 1 列数值明显大于第 2 列数值,小于其他列,表层土壤田间持水量与其他土层田间持水量存在差异,40—50 cm 土层在各层次间相关系数最大,说明 40 cm 与

50 cm 土层田间持水量差异最小。除去表层土壤外 40—50 cm 土层相关系数大于 30—40 cm 土层,说明 40 cm 与 50 cm 土层土壤田间持水量较上层土壤更为接近,且 40—50 cm 土层相关系数大于 50—60 cm,同时 30—50 cm 土层相关系数明显小于 40—60,50—70,60—80 cm 土层的相关系数,50 cm 上下层土壤持水能力存在明显差异,所以 50 cm 土层很可能是甘肃地区田间持水量的分界层。

2.3 甘肃省凋萎湿度的变化

利用甘肃地区全省范围内 77 个实测点的凋萎湿度数据,绘制了土壤凋萎湿度等值线(图 4),等值线以线距 1% 划出 12 条等值线,选取 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 cm 土层土壤的凋萎湿度进行分析。由图 4 可知,不同气候类型区不同深度的的土壤凋萎湿度有所不同,主要表现在河西冷温带、暖温带干旱区及高寒半干旱半湿润区的凋萎湿度在 10—50 cm 土层呈增加—降低—增加的趋势,高值区位于高寒半干旱半湿润区及冷温带干旱区的中部(9%~12%);甘南高寒湿润区 10—50 cm 土层土壤凋萎湿度较高(8%~11%),而 60—100 cm 土层的土壤凋萎湿度明显降低;陇中冷温带半湿润区、陇南暖温带湿润区及陇南南部北亚热带半湿润区 10—50 cm 土层土壤凋萎湿度变化随土层深度的增加呈增加趋势,80 cm 土层凋萎湿度较其他层次土层偏低。不同层次间田间持水量与凋萎湿度呈极显著相关($Y=55.20e^{-0.15x}$, $R^2=0.708$, $P<0.01$)。

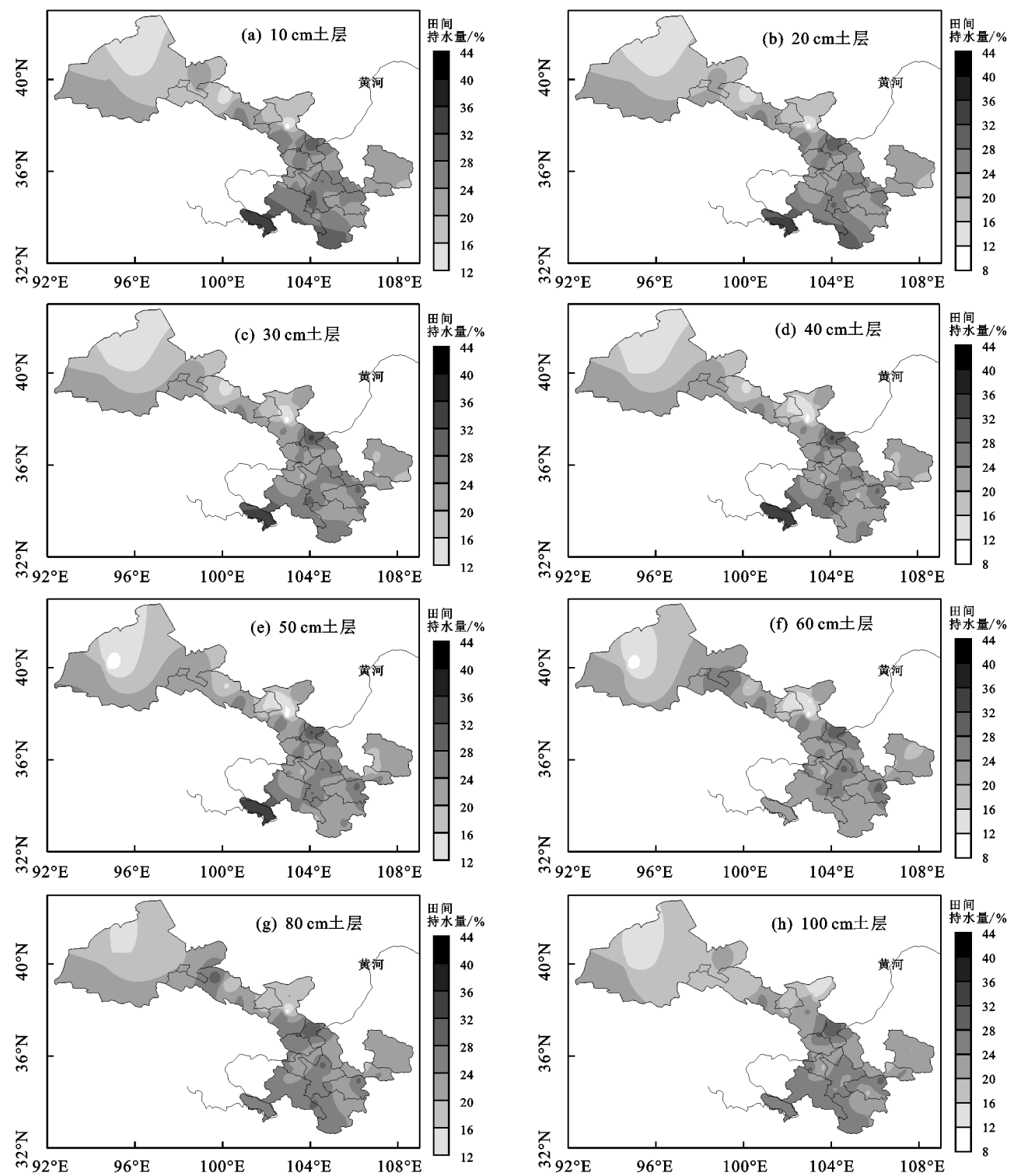


图 3 甘肃省田间持水量等值线

表 3 不同层次间田间持水量的关系

土层深度/cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm	90 cm
20	0.962								
30	0.571	0.499							
40	−0.032	−0.216	0.488						
50	−0.161	−0.340	0.460	0.953					
60	−0.056	−0.248	0.602	0.862	0.948				
70	−0.253	−0.419	0.502	0.761	0.818	0.880			
80	−0.147	−0.337	0.526	0.751	0.849	0.950	0.934		
90	−0.372	−0.533	0.290	0.638	0.702	0.754	0.934	0.826	
100	−0.270	−0.415	0.393	0.631	0.800	0.897	0.833	0.939	0.771

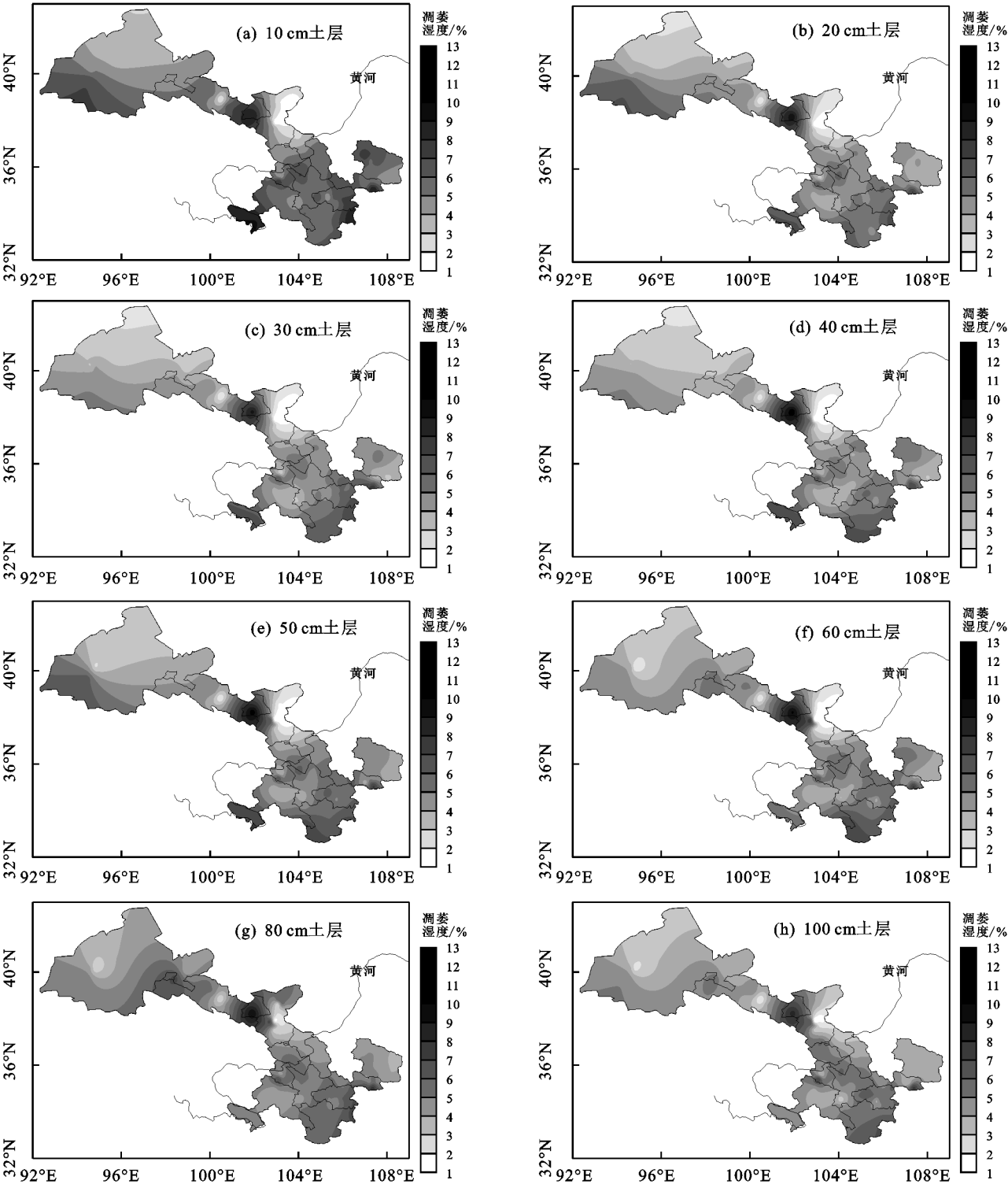


图 4 甘肃省土壤凋萎湿度的等值线

2.4 甘肃省土壤水分性质评价

甘肃省范围内不同土壤容重下田间持水量存在一定差异。本研究按不同气候类型区分别对 10—100 cm 土层土壤容重与田间持水量的相关性进行分析(表 4),亚热带半湿润区、暖温带湿润区、冷温带半湿润区、冷温带半干旱区、冷温带干旱区 5 个气候区的田间持水量随土壤容重的增加呈减少趋势,其中暖温带湿润区、冷温带半湿润区、冷温带半干旱区 10—100 cm 土层土壤容重与田间持水量显著相关,可见

各地的田间持水量在较高的土壤容重下具有较低的水势,而暖温带半干旱区、高寒带半干旱半湿润区、高寒带湿润区田间持水量随土壤容重的增加呈增加趋势,高寒带半干旱半湿润区、高寒带湿润区显著相关,可能与这 3 个地区的气候条件有关。

田间持水量和萎蔫湿度之间的土壤含水量用于计算灌溉所使用的水深,并确定水的可利用量,这是评估土地适宜性的关键因素^[14-15]。现将甘肃省土壤水分性质按照不同土壤质地汇总(图 5),由于中壤

土、沙壤土、黄黏土、砂土样本点较少,因此选择样本点较多的7种土壤质地进行分析(表5),可见壤土遍布全省整个区域,分布范围广泛,砂壤土主要分布在干旱区与半干旱区,黏壤土主要分布在湿润、半湿润与半干旱地区,粉黏土主要分布在半湿润区,粉土与面砂土主要分布在半干旱与半湿润地区,4种壤土中砂壤土土壤容重最大,田间持水量、萎蔫湿度均较低,即砂壤土的持水性能与供水性能均较差,黏壤土的土壤容重在植物生长范围内,粉壤土与黏壤土田间持水量与萎蔫湿度均较高,土壤的持水性能与供水性能较好,面砂土土壤容重、田间持水量、凋萎湿度的分布范围较广。

表4 不同土壤容重与田间持水量的相关性分析

气候区	相关系数	概率
亚热带半湿润区	-0.145	0.512
暖温带湿润区	-0.341**	0.001
暖温带半干旱区	0.139	0.516
冷温带半湿润区	-0.410**	0
冷温带半干旱区	-0.599**	0.003
冷温带干旱区	-0.189	0.068
高寒带半干旱半湿润区	0.696**	0.003
高寒带湿润区	0.821**	0

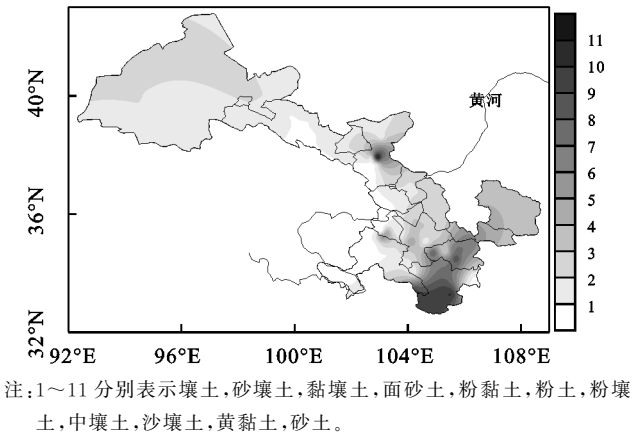


图5 甘肃省土壤质地区划

表5 甘肃省土壤水分性质

土壤类型	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	田间 持水量/%	萎蔫 湿度/%
壤土	1.27~1.40	22.0~23.0	5.5~6.0
砂壤土	1.32~1.48	21.3~23.4	4.7~5.7
粘壤土	1.23~1.34	23.2~25.9	6.4~7.1
粉壤土	1.22~1.44	23.1~24.4	6.7~7.1
面砂土	1.18~1.35	20.5~23.3	4.9~7.1
粉粘土	1.31~1.47	21.8~24.3	5.3~6.4
粉土	1.27~1.47	21.0~22.3	5.0~5.9

3 讨论

土壤压实主要由于人为、自然等原因造成土壤孔隙度的降低,在压实的土壤中高机械阻力限制了植物对水和养分的吸收,并抑制了根系的发育,而在农业生产中,土壤的压实是由动物践踏和重型机械的反复运输引起的,这几乎影响了土壤的所有功能^[16]。就

目前而言,土壤压实的风险逐渐增加,并且对环境和农业产生了显著的负面影响。有研究^[17]发现,压实对城市绿化用地影响较重,各层土壤物理性质的影响表现为表土层>浅土层>深土层,人为践踏只影响到表层土壤。甘肃省全省的土壤容重范围为0.89~1.79 g/cm³,平均容重为1.36 g/cm³,属于紧实级别,总体来说超出植物适宜生长的范围,部分地区存在压实及人为因素的影响,全省大部地区需要采取一定的措施来改良植物的生长条件。

对于不同气候类型区、不同质地土壤容重特征的研究,有学者^[18]认为,兴隆山森林群落土壤容重随土壤深度的增加而增加,易小波等^[19]发现,黄土高原南北样带土壤容重0—20 cm较20—40 cm土层更易受到外界因素的影响,黄土高原4种植被类型土壤容重随着土层深度的增加,土壤容重大体呈增加趋势^[20],甘肃省全省不同气候区域不同土壤质地的土壤容重最小值在10—20 cm土层,最大值出现在30—50 cm土层,主要原因是表层土壤较为松弛,有利于植物根系生长,有机质含量较高,而深层土壤较为紧实,有机质含量随土层深度增加而降低^[20]。本研究发现,在10,50 cm土层干旱区与湿润区分别与半湿润区和半干旱区浅层土层存在显著差异,且半湿润区、半干旱区土壤容重浅层与深层差异显著,浅层土壤更易受到外界环境及人为的干扰,这与易小波等^[19]的研究结果相一致。就平均土壤容重方面,本研究发现,面砂土土壤容重最小,砂壤土的土壤容重最大,砂壤土主要分布在干旱区,而70—90 cm土层砂壤土与面砂土土壤容重存在显著性差异,可见主要分布在干旱区的砂壤土其下层土壤容重过大会导致土壤的透气性变差,根系生长速度减缓,吸收营养的能力降低^[21],因此对作物品种及生长要求较高。田间持水量作为土壤水分的重要参数,对于生态环境的改善及水土流失的研究具有重要意义^[22]。相关研究^[23-24]表明,黄土高原干旱与半干旱区田间持水量呈东南向西北递减的趋势,甘肃地区陇西黄土高原的田间持水量明显高于陇东黄土高原。本文利用甘肃省气候分区对田间持水量进行分析,甘肃省田间持水量地区差异明显,田间持水量由西北向东南方向递增,最大值在高寒湿润区10—50 cm土层,该区域土壤质地主要是壤土,且10—50 cm土层田间持水量明显高于60—100 cm土层,可能是由于土层越深,土壤的孔隙度越小,深层田间持水量偏低,但未考虑土壤有机质及土地利用情况对田间持水量的影响;陇中冷温带半湿润区、陇南暖温带湿润区及亚热带半湿润区3个区域的田间持水量呈增加—降低—增加的变化趋势,表层土壤田间持水量最高,土壤质地为壤土、粉壤土、黏壤土,这与蔡福等^[25]研究结果相似。通过对10—100 cm各土层土壤田间持水量的相关分析,探究不同层次间土壤

田间持水量的垂直分布特征,通过相关系数的大小来判断不同层次土壤之间的相似性^[25],本研究发现,10 cm 与 20 cm 土层差异较小与其他层次间存在较大差异,即表层土壤与深层土壤的田间持水量存在差异,40 cm 与 50 cm 间田间持水量较为相似;50 cm 上下层土壤持水能力存在明显差异,50 cm 土层很可能是甘肃地区土壤田间持水量的分界层。

土壤的凋萎湿度是土壤有效水的下限,作为估算作物水分需求,模拟土壤水分的重要参数,研究土壤凋萎湿度的变化具有重要的意义^[6]。对于不同气候区不同层次土壤凋萎湿度的研究,有学者^[24]发现,甘肃黄土高原区域的土壤凋萎湿度变化趋势不明显,0—50 cm 陇西黄土高原东部最大,50—100 cm 的凋萎湿度明显低于上层,段兴武等^[6]研究东北黑土区土壤凋萎湿度发现,随着土层深度增加凋萎湿度呈增加趋势。成兆金等^[26]对山东省 0—100 cm 不同土壤类型的凋萎湿度研究发现,3 种土壤质地的凋萎湿度大小为黏土>壤土>沙土。本文对不同气候区不同层次土壤凋萎湿度进行分析,10—50 cm 土层甘南高寒湿润区及冷温带干旱区、高寒半干旱半湿润区中部凋萎湿度最大,60—100 cm 土层冷温带干旱区、高寒半干旱半湿润区中部最大。甘南高寒湿润区各土层深度的凋萎湿度的变化趋势与田间持水量的变化趋势相一致,浅层的土壤凋萎湿度较高而深层的土壤凋萎湿度较低,这与段兴武等^[6]研究结果相似,陇中冷温带半湿润区、陇南暖温带湿润区及陇南南部北亚热带半湿润区 10—50 cm 土层土壤凋萎湿度明显高于 60—100 cm 土层,且凋萎湿度最大值出现在陇西黄土高原的东部,与蒲金涌等^[24]研究结果一致。

从甘肃省不同质地土壤水分常数可以看出,全省大部地区主要以壤土为主,一般壤土的有效水相对于砂质土壤和黏土较多^[27],可见甘肃省大部地区植物对水分的利用较为有效。干旱区与半干旱北部地区以砂壤土为主,土壤容重较大,土壤的持水性能与供水性能相对较差,这与邹立尧等^[27]研究相一致,该地区对植物的品种及抗旱能力要求较高;半湿润区、湿润区及半干旱南部地区以粉壤土与黏壤土为主,田间持水量与凋萎湿度均较高,黏壤土土壤容重在植物生长范围内,土壤的持水性能与供水性能较好,加之半干旱、半湿润区土层深厚、蓄水性较好、耕作层良好,有利于植物的生长,但要考虑部分地区植被覆盖及较高的通量密度造成高蒸发而不利于保墒的问题,应做好提高土壤抗旱的应对措施^[24,28]。

4 结论

甘肃省全省的土壤容重属于紧实级别,其中半湿润区、半干旱区土壤容重浅层与深层差异显著,从平均土壤容重来看,砂壤土的土壤容重最大,主要分布

在干旱区。

甘肃全省大部地区田间持水量由西北向东南呈增加趋势,田间持水量的最大值在高寒湿润区 10—50 cm 土层,50 cm 土层是甘肃地区土壤田间持水量的分界层,其上下层田间持水量存在明显差异。各土层凋萎湿度最大值位于冷温带干旱区、高寒半干旱半湿润区中部,不同层次间田间持水量与凋萎湿度呈极显著相关。

甘肃省全省大部地区主要以壤土为主,除此之外干旱区与半干旱区北部地区以砂壤土为主,土壤容重较大,土壤的持水性能与供水性能相对较差;半湿润区、湿润区及半干旱南部地区主要以粉壤土与黏壤土为主,土壤的持水性能与供水性能较好,有利于植物的生长。

参考文献:

- [1] Lu Y W, Si B C, Li H J, et al. Elucidating controls of the variability of deep soil bulk density[J]. *Geoderma*, 2019, 348: 146-157.
- [2] Tian Z C, Ren T S, Hortond R, et al. Estimating soil bulk density with combined commercial soil water content and thermal property sensors[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 1-8.
- [3] Ferreira T R, Borges J A R, Pires L F. Representative elementary area for soil bulk density measurements of samples collected in volumetric rings by CT image analyses[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 152: 74-84.
- [4] 罗清元, 杨丹, 刘丽娜, 等. 基于不同环境下的河南省典型区域土壤田间持水量研究[J]. *节水灌溉*, 2019(6): 35-38, 42.
- [5] Aschonitis V G, Antonopoulos V Z, Lekakis E H, et al. Estimation of field capacity for aggregated soils using changes of the water retention curve under the effects of compaction[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64: 688-698.
- [6] 段兴武, 谢云, 冯艳杰, 等. 东北黑土区土壤凋萎湿度研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 212-216.
- [7] Al-shammary A A G, Kouzani A Z, Kaynak A, et al. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(4): 581-596.
- [8] Li S, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil bulk density and its controlling factors in an agricultural intensive area of Chengdu Plain, Southwest China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(2): 290-300.
- [9] 宋丽, 杨秀云, 米美霞, 等. 太原市公园绿地土壤容重特征研究[J]. *山西农业科学*, 2020, 48(5): 779-783.
- [10] 田皓, 张红燕, 徐向明, 等. 不同土壤质地对作物凋萎湿度及苗期生长的影响[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(20): 779-783.
- [11] 王胜, 王毅荣. 甘肃春小麦产量时空分布及其气候响应[J]. *干旱气象*, 2013, 31(2): 298-302.

- [11] 尤南山,董金玮,肖桐,等.退耕还林还草工程对黄土高原植被总初级生产力的影响[J].地理科学,2020,40(2):315-323.
- [12] 胡鹏飞,李净,张彦丽,等.黄土高原水储量的时空变化及影响因素[J].遥感技术与应用,2019,34(1):176-186.
- [13] 穆兴民,徐学选,王文龙,等.黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响[J].土壤学报,2003,40(2):210-217.
- [14] Lü M X, Ma Z G, Li M X. Quantitative analysis of terrestrial water storage changes under the grain for green program in the Yellow River Basin[J].Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(3): 1336-1351.
- [15] 刘欢欢,王飞,张廷龙.CLDAS 和 GLDAS 土壤湿度资料在黄土高原的适用性评估[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):270-276,294.
- [16] 郭永强.黄土高原植被覆盖变化归因分析及其对水储量的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [17] 邹贤才,金涛勇,朱广彬.卫星跟踪卫星技术反演局部地表物质迁移的 MASCON 方法研究[J].地球物理学报,2016,59(12):4623-4632.
- [18] 吴奇凡.黄土高原陆地水储量变化归因分析及区域尺度地下水补给[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [19] Li J J, Li Z, Lu Z M. Analysis of spatiotemporal variations in land use on the Loess Plateau of China during 1986—2010[J].Environmental Earth Sciences,75(11):e997.
- [20] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J].Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [21] 刘垚焱,曾鹏,张然,等.基于 GEE 和 BRT 的 1984—2019 年长三角生态绿色一体化发展示范区植被覆盖度变化[J].应用生态学报,2021,32(3):1033-1044.
- [22] 皮青山,席茜,周玉科.Google Earth Engine 云平台及植被遥感案例研究[J].测绘与空间地理信息,2021,44(2):38-41.
- [23] 张晨成,邵明安,王云强,等.黄土区切沟对不同植被下土壤水分时空变异的影响[J].水科学进展,2016,27(5):679-686.
- [24] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8): 1975-1983.
- [25] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J].生态学报,2020,40(11): 3795-3803.

(上接第 220 页)

- [12] 秦娟,许克福.我国城市绿地土壤质量研究综述与展望[J].生态科学 2018,37(1):200-210.
- [13] 王瑜,朱清科,赵维军,等.陕北黄土区人工林地土壤水分的垂直变化规律[J].中国水土保持科学,2015,13(6):54-60.
- [14] Santra P, Kumar M, Kumawat R N, et al. Pedotransfer functions to estimate soil water content at field capacity and permanent wilting point in hot Arid Western India[J].Indian Academy of Sciences,2018,35:1-16.
- [15] Mohanty M, Sinha N K, Painuli D K, et al. Modelling soil water contents at field capacity and permanent wilting point using artificial neural network for Indian soils[J].National Academy Science Letters, 2015, 38(5):373-377.
- [16] Ungureanu N, Vladut V, Biris S S, et al. Changes in bulk density as indicator of soil compaction[Z].International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development,2018:391-396.
- [17] 丛晓峰,刘立成,王宇超,等.不同干扰对城市绿化用地土壤物理性质的影响[J].中国农学通报,2015,31(28): 166-172.
- [18] 魏强,凌雷,王多锋,等.不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质[J].西北林学院学报,2019,34(4):26-35.
- [19] 易小波,邵明安,赵春雷,等.黄土高原南北样带不同土层土壤容重变异分析与模拟[J].农业机械学报,2017,48(4):198-205.
- [20] 吴江琪,马维伟,李广,等.黄土高原 4 种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):133-138.
- [21] 张亚如,侯凯旋,崔洁亚,等.不同土层土壤容重组合对花生衰老特性及产量的影响[J].花生学报,2017,46(3):26-31.
- [22] 张笑培,杨改河,胡江波,等.不同植被恢复模式对黄土高原丘陵沟壑区土壤水分生态效应的影响[J].自然资源学报,2008,23(4):635-642.
- [23] 游松财,邸苏闯,袁晔.黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J].自然资源学报,2009,24(3):545-552.
- [24] 蒲金涌,冯建英,姚晓红,等.甘肃黄土高原土壤农业水分常数分布特征[J].干旱地区农业研究,2008,26(3): 205-209.
- [25] 蔡福,明惠青,张淑杰,等.辽宁农田土壤田间持水量的空间变异性分析[J].气象与环境学报,2009,25(1):27-30.
- [26] 成兆金,李斌.山东省土壤水分自动站土壤水分常数评估[J].湖北农业科学,2017,56(18):3468-3483.
- [27] 邹立尧,赵秀兰.黑龙江省农田土壤水分的时空分布规律[J].黑龙江气象,2001(3):34-38.
- [28] 郭海英,马鹏里,杨兴国,等.陇东黄土高原塬区冬小麦越冬期土壤水分损耗规律浅析[J].土壤通报,2005,36(2):165-168.