

沙漠化过程中土壤物理性质特征研究进展

其乐木格

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2022年4月27日; 录用日期: 2022年5月26日; 发布日期: 2022年6月2日

摘 要

沙漠化是目前全球面临最为严峻的生态环境 - 社会 - 经济问题之一, 而土壤是土壤 - 植被 - 大气连续体系统的重要组成部分, 其中土壤物理性质是反映土壤结构和评价土壤质量的重要指标。本文主要综述了沙漠化过程中土壤物理性质变化特征的研究, 以期对沙地土壤恢复和沙漠化整治提供一定的科学依据。

关键词

土地沙漠化, 土壤物理性质, 分布特征

Research Progress on Distribution Characteristics of Soil Physical Properties in Desertification Process

Tselmeg

College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Apr. 27th, 2022; accepted: May 26th, 2022; published: Jun. 2nd, 2022

Abstract

Desertification is one of the most serious eco-environmental-social-economic problems facing the world at present. Soil is an important part of the soil-vegetation-atmosphere continuum system, and soil physical properties are important indicators to reflect soil structure and evaluate soil quality. In this paper, the changes in soil physical properties during the process of desertification are reviewed, to provide some scientific basis for soil restoration and desertification control in sandy land.

Keywords

Land Desertification, Soil Physical Properties, Distribution Characteristics

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沙漠化是目前全球面临的最为严峻的生态环境 - 社会 - 经济问题之一。全球约有 16.67% 的人口受到沙漠化的影响, 70% 的农田和 1/4 的陆地受到沙漠化威胁, 据估计, 每年沙漠化造成的经济损失是人类治理所花费的五倍[1] [2]。随着自然因素和人为活动的双重影响, 全球干旱、半干旱地区的土地沙漠化面积逐渐扩大, 其中我国是受沙漠化影响最严重的国家之一。根据国家林业和草原局政府网发布的《第五次全国荒漠化和沙化状况公报》统计出, 172.12 万 km² 面积的土地已被沙化, 占国土总面积的 17.93%, 分布在 30 个除上海、台湾及香港和澳门特别行政区外的省, 其中西藏、新疆、青海、内蒙古、甘肃 5 省(自治区)沙化明显严重。

土壤是土壤 - 植被 - 大气连续体系统的重要组成部分, 也是人类赖以生存的基础, 也是动植物以及微生物的基本环境。土壤的形成过程在多种因素的相互作用下复杂又缓慢, 不同因素的影响下必然会形成多种特性。最初人类对土壤仅仅认识土壤的颜色, 粗细等表面特征, 而在 18 世纪初期, 德国著名化学家李比希在前人申纳比尔(Senebier)、沙苏尔(Saussure)研究的基础上使用精确的化学方法, 确定了植物对于一些元素的必须性[3]。土壤是监测沙漠化的主要指标之一, 由于土壤的形成过程复杂, 必然会有物理性质、化学性质、生物性质等多种土壤性质, 这些特性能够看出土壤现状及肥力情况。其中土壤物理性质不仅决定土壤中水、气、热和生物状况, 而且影响土壤中植物营养元素的有效性和供应能力, 是反映土壤结构和评价土壤质量的重要指标[4]。因此研究沙漠化过程中的土壤物理性质对于沙地土壤恢复以及沙漠化综合整治提供理论依据。

2. 沙漠化的定义及形成

沙漠化是 21 世纪全球所面临最严峻的生态环境问题之一, 也是土地荒漠化的主要表现形式。首次提出土地荒漠化问题是 1937 年在一篇赤道森林荒漠化景观的论文里[5], 但最早提出实际意义上的土地沙漠化是在 1959 年法国学者提出, 他将沙漠化为“人为作用下所导致的干旱、半干旱地区沙质草原沙化问题”[6]。20 世纪 70 年代初期在非洲西部地区出现长期的极端干旱气候, 导致耕地和草地的大面积退化。为此, 1974 年和 1975 年国际地理学会对荒漠化的概念、成因机制、过程、问题或看法进行了专题讨论会, 没有得到统一的结果[7] [8]。在此之后, 在 1977 年联合国荒漠化大会(UNCOD)上首次系统的总结、分析了荒漠化问题, 编制了第一张全球荒漠化分布图, 因此推动了全球性的沙漠化研究[9]。这次会议以后, 沙漠化的概念由我国朱震达先生正式提出, 他将其定义为“沙漠化是沙质荒漠化的简称, 其含义可以概括为在干旱、半干旱地区(包括部分半湿润)的脆弱生态环境条件下, 由于人为过渡的经济活动, 破坏了生态平衡, 使原非沙漠地区出现了风沙活动为主要特征的类似沙质荒漠环境的退化”[10] [11]。但在此之前, 20 世纪 50 年代至 60 年代中期, 中国科学院治沙队进行了全国范围内的沙漠考察和治理的综合研究, 在竺可桢先生指导时经常谈论沙漠的形成、危害及其防治等的相关问题; 同时, 众多学者的研究理论基础下, 成立了陕西北部防护林, 建立了铁路防沙实验和防护体系, 以及沙区的首次进行飞播造林种草[12]。

国内外研究者指出沙漠化是由人为活动和自然因素的双重影响下导致。1949年法国学者 Aubreville A 的研究表明由于滥伐和火烧非洲热带森林界线后退,由森林变成草原后又变成沙漠,将其过程称之为荒漠化[13]。由于沙漠化的发生机制之间交互作用非常复杂,各国学者对沙漠化成因的研究也成为了热点,其中自然因素的影响是沙漠化的重要成因机制之一。研究指出非洲气候变化的主要原因为大气对全球海洋表面温度变化的响应[14],并有科学家认为气候异常对地-气之间的相互作用增强了土地沙漠化现象[15],指出气候变化对陆地生态系统的影响及其反馈机制是全球土地沙漠化研究的热点,而大风是干旱半干旱地区草地沙化的动因之一。草地因风蚀而发生沙化,大风吹蚀土壤中的细粒物质,土壤容重加大,孔隙度减小,导致土壤透水性增加,持水量降低,加大水分蒸散与渗入,制约草地植被的发育,而草地植被的退化又为土壤风蚀提供了必要的条件[16]。草地植物种类的变化也会造成沙化,研究表明草地灌丛化现象的出现破坏草地植被的均一性,并加速土壤侵蚀程度,导致草地盖度和生产力的降低[17]。另外,沙漠化不仅与全球气候变化、环境、土壤、植物等自然因素有关,更与人类的活动密不可分,是自然和人类各种因素综合作用的结果[18]。人类、土壤、植被、大气、动物等互相反馈使得生态保持稳定,并反馈的过程也存在互相遏制,但沙漠化引起的干扰使很多反馈变成正反馈,干扰被放大,往往使沙漠化开始加速,从而陷入一个恶性循环之中[2]。Garduno MA 认为[19]是由于人类滥用土地使得干旱、半干旱和一些半湿润生态环境日趋恶化,造成沙漠化。但 Verstraete 等[20]认为沙漠化的驱动力应该来源于自然条件和人为因素的综合影响,主要的人为因素包括人口压力、灌溉、放牧等。杨梅焕等研究指出沙漠化过程伴随着植被的退化和植被稳定性程度的降低,维持土壤—植被系统的良性循环是植被恢复的关键,也是沙漠化治理的关键[21]。近几年,各国对沙漠化的研究越来越全面,利用自然、社会以及人文因素等的综合指标,更加完善了对沙漠化发生机制的研究[22]。

3. 土壤的主要物理性质

土壤物理性质主要包括土壤质地、比重、容重、孔隙度、结构、水分、热量和空气状况,以及土壤的机械物理性质和电磁性质等方面[23]。这些性质之间有着相互影响、相互制约的关系,其中以土壤质地、土壤结构和土壤水分居主导地位,它们的变化会导致土壤其他物理性质的变化[24]。基于 CNKI 统计土壤物理性质的研究(图 1)可知,文献量多于 300 的研究有土壤物理性质、容重、孔隙度、含水量、理化性质等,文献量在 100~300 的研究有土壤持水量、水分、团聚体、深度、导水率等,土壤紧实度、质量、颗粒组成等的研究文献量均小于 100,说明国内土壤物理性质的研究围绕综合物理性质、单个物理指标、理化性质以及土壤质量等方面展开。由于自然条件以及人为活动的差异,土壤物理性质存在较强的空间变异性。王政权[25]等采用地统计学的方法,研究了阔叶红松林上层土壤物理因子的空间异质性。徐丽恒[26]等在腾格里沙漠南缘,选取流动沙丘、封育 5a、封育 15a 和封育 25a 等样地,对沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征进行了分析。王辉[27]等以玛曲县高寒草地为研究对象,采用空间序列代替时间序列的研究方法,对该区不同沙化程度草地的土壤物理性质变化进行分析研究。曹鹤[28]等研究了华南地区 8 种林地的土壤物理性质,根据土壤特点将其分为 4 种类型。张鼎华[29]等研究了刺槐与杨树混交林后沙地土壤水分-物理性质变化的状况,发现刺槐与杨树混交后土壤最大持水量增加,毛管持水量、田间持水量、有效持水量、总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度均得以提高,并由此改善了混交林土壤的渗透性能。土壤物理性质单个指标的研究多围绕土壤容重[30]、孔隙度[31]、水分[32]、团聚体[33]等多方面。同时,土壤物理性质与土壤化学性质具有密切的关系,随着土壤物理性质的变化,土壤化学性质也会有相应的变化。土壤物理性质是表征土壤质量的重要因子,与土壤化学、生物性质共同决定着土壤质量状况。近几年,随着沙漠化问题日趋严重,土壤结构遭到破坏,导致土壤物理性质恶化,严重影响了土壤生产力。

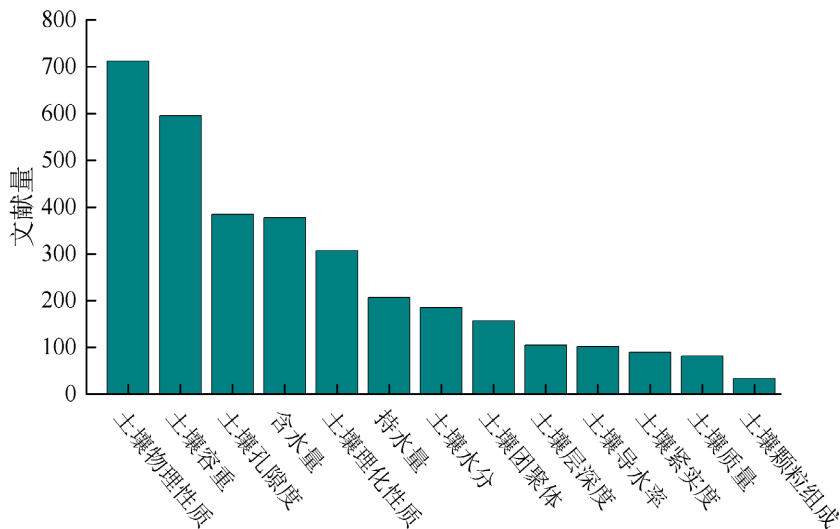


Figure 1. Research statistics based on CNKI soil physical properties
图 1. 基于 CNKI 土壤物理性质的研究统计量

4. 沙漠化过程对土壤物理性质的影响

沙漠化过程中沙地土壤物理性质的相互作用、变化规律以及影响因素均存在差异，由此本文选取土壤容重、水分、团聚体、颗粒组成等重要的土壤物理性质进行了论述。

4.1. 沙漠化过程中土壤容重变化

土壤容重是土壤的一个基本物理性质，对土壤的透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征以及土壤的抗侵蚀能力都有非常大的影响[34]。沙地植被恢复时，土壤容重降低、孔隙度增加，土壤结构会得到改善，所以容重的降低能够作为沙地土壤物理性质改善的标志[35] [36]。如果土壤容重较大，表明土体紧凑，通透性和结构性差，相反容重小，说明土壤松散，渗透性好[37]。有研究对比呼伦贝尔沙地和松嫩沙地的土壤理化性质表明，随着沙漠化的发展两个沙地的土壤容重均呈增加趋势(表 1)，其中非沙化 0~20 cm 的土壤容重松嫩沙地略低于呼伦贝尔沙地，并其原因为松嫩沙地的原始土壤物理特性要好于呼伦贝尔沙地[38]。沙地土壤容重的异质性和区域性除了原始土壤特性，也与沙地的驱动机制有关。研究发现，沙地不同地貌部位的土壤容重随放牧强度的增加而变大[39]，并研究表明围栏禁牧 16 年 0~10 cm 土壤容重显著小于持续放牧区[40]。不同利用强度及方式会导致土壤容重的异质性，同时风蚀也会导致沙地土壤颗粒变粗，而造成土壤容重的升高[41]。总之，沙地土壤恢复过程中容重的降低能够表征土壤的改善，并多种影响因素的相互作用会导致沙地土壤容重的差异性。

Table 1. Changes of soil bulk density in sandy land with different desertification degree [38]

表 1. 沙地不同沙化程度土壤容重的变化[38]

沙地	深度	非沙化(g·cm ³)	轻度沙化	重度沙化
松嫩沙地	0~10 cm	1.42 ± 0.05	1.45 ± 0.05	1.47 ± 0.01
	10~20 cm	1.39 ± 0.06	1.48 ± 0.01	1.52 ± 0.03
呼伦贝尔沙地	0~10 cm	1.53 ± 0.03	1.55 ± 0.03	1.58 ± 0.04
	10~20 cm	1.56 ± 0.05	1.67 ± 0.02	1.69 ± 0.05

4.2. 沙漠化过程中土壤含水量的变化

土壤水分的变化对于植被的种类以及生长具有重要意义,是制约土地沙漠化的主导因素,水分的空间变化和时间动态变化有助于水文与生态环境之间建立定量的联系[42] [43]。沙质土壤的保肥保水能力差,并在海拔不同的情况下土壤水分将会重新分配,从而导致土壤养分的改变,影响不同微地形的植被分布[44]。另外,土壤含水量也是重要的抗风蚀因子,研究发现当沙地含水量<2%时抗风蚀能力不稳定,且>2%时趋于稳定[45]。不同利用方式及强度对土壤含水量也具有一定的影响,家畜过度啃食与践踏使地表土壤变得紧实,植被盖度降低,裸露地表面积增加,因此加快了地表水分蒸发,并在风蚀加重的情况下,粘粒含量减少,保水能力下降,使得沙地 0~10 cm 的土壤层含水量逐渐降低[40]。不同沙化程度土壤含水量的变化如表 2 所示,研究表明随着沙漠化的发展土壤含水量有减少趋势[46] [47]。在垂直方向上,未沙化草地 0~30 cm 土壤含水量明显高于沙化草地,其中沙化草地土壤含水量随土层深度的增加有所上升[48]。有研究发现植被入侵流动沙丘丘间低地与迎风坡的过渡带裸沙的过程中,土壤水分是主要的制约因素,植被自然恢复更多地依赖于从沙丘附近植物群落传播来的种子[49]。总之,土壤水分的水平和垂直分布影响着沙地土壤养分、植被变化以及沙漠化的发展程度。

Table 2. Changes of soil water content in different desertification degrees

表 2. 不同沙化程度土壤含水量的变化

研究区	未沙化(%)	轻度沙化	中度沙化	重度沙化
川西北不同程度沙化草地[46]	39.17 ± 15.77	16.20 ± 8.34	13.23 ± 5.01	9.12 ± 1.17
玛曲高寒草甸[47]	21.76 ± 0.78	6.26 ± 0.29	4.22 ± 0.01	3.92 ± 0.20

4.3. 沙漠化过程中土壤团聚体变化

土壤团聚体是矿物颗粒与有机、无机物结合而成的颗粒,是土壤结构的重要指标,其变化能够影响土壤孔隙状况,从而改变土壤通气、透水性[50]。根据粒径大小可以将土壤团聚体分为大团聚体和微团聚体,大团聚体对周围环境变化、土地管理措施特别灵敏,稳定性相对较弱;而微团聚体稳定性相对较强,尤其是大团聚体中包含的微团聚体[51]。同时,良好且稳定的土壤团粒结构,直接影响着土壤水量的储存和营养物质的富集,也深刻影响着土壤的抗蚀能力[52]。而且土壤团聚体的稳定与有机碳有着紧密联系,研究表明表层土壤的团聚体内有约 90%的有机碳,且随着团聚体粒径的变化,其保有的有机碳含量也在变化[53]。江仁涛[54]等研究发现土壤团聚体稳定性和有机碳指标可作为川西北高寒沙地土壤生态修复适应性指标,红柳恢复对该区沙化土壤改良具有重要作用。不同沙化程度下土壤团聚体结构存在明显的差异性,且含量变化如表 3 所示,研究发现当高寒草地从中度沙化向重度沙化转变阶段,0.5~2 mm 粒级团聚体的减少和≤0.25 mm 粒级团聚体的增加均表现为显著[55]。沙漠化导致土壤团聚体结构不稳定,研究表明利用方式对团聚体稳定性和抗侵蚀能力有不同的影响[56]。总之,土壤团聚体是监测土壤质量的重要指标之一,并对于沙地土壤恢复具有一定的影响。

Table 3. Changes of soil aggregates under different desertification degrees in alpine grassland [55]

表 3. 高寒草地不同沙化程度下土壤团聚体的变化[55]

土壤团聚体	未沙化(%)	轻度沙化	中度沙化	重度沙化
≤0.25 mm	36.59	38.46	37.39	6.52
0.25~0.5 mm	63.24	61.30	62.36	93.15
0.5~2 mm	0.17	0.24	0.25	0.33

4.4. 沙漠化过程中土壤颗粒组成变化

土壤颗粒组成又称土壤质地，指土壤中矿物颗粒的大小及其组成比例，其中土壤细颗粒具有一定的抗风蚀能力，土壤颗粒是决定土壤抗风蚀能力的关键，也是土壤结构的重要因子之一[57] [58]。土壤颗粒中不同粒径的含量决定着土壤性质，以砂粒为主的砂壤保肥能力弱、养分缺乏，有机质含量少、分解快、持水能力低、缓冲能力差、污染物易于渗漏，但通气透水性好、升温快；而以黏粒为主的土壤与此相反，粉粒为主的土壤介于这两者之间[59]。随着沙漠化的发展以及风的分选和吹蚀作用下，地表裸露面积增加，加上风蚀等外力作用下，土壤细颗粒被吹走，粗粒累积，进而加速土地沙漠化[60] [61]。沙漠化程度对草地土壤颗粒组成的影响如图2所示，发现沙漠化强度的增加导致了土壤颗粒的粗粒化[48]。朱志梅[62]等研究发现沙漠化过程中，不同颗粒对保水保肥和土壤团粒结构形成的贡献不同，并细颗粒的减少抑制了土壤的可塑性及离子交换等物理性质。赵哈林[63]等对比科尔沁沙地和呼伦贝尔沙地的土壤理化性质发现，土壤黏粉粒含量均大幅度下降，科尔沁沙地土壤机械组成的变化幅度要大于呼伦贝尔沙地，而且前者黏粉粒主要释放期早于后者。同时，不同利用方式会导致土壤颗粒组成的差异性，研究发现放牧压力的加大，使地表植被受损，植被盖度、高度下降，裸露地表面积增加，土壤蒸发加强，风蚀严重吹走粘粒，粘粒含量逐步减少，砂粒明显聚集[40]。随土壤颗粒组成的变化，土壤的其他指标也有着相应的改变，且能够直接表征沙地土壤的保肥保水能力及结构特征。

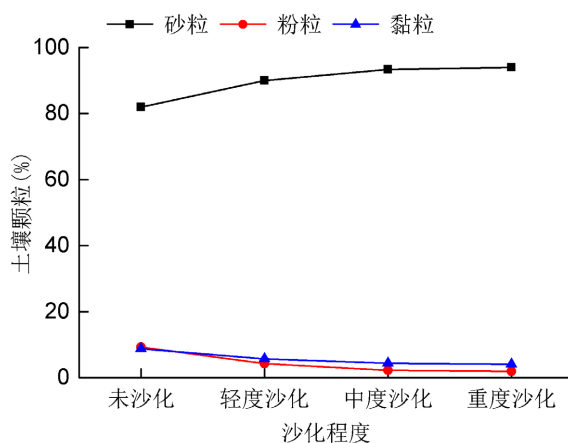


Figure 2. Changes of soil particle composition in grassland under different desertification degree [48]

图2. 不同沙化程度下草地土壤颗粒组成的变化[48]

5. 小结

沙漠化过程中土壤容重、含水量、团聚体、颗粒组成等土壤重要的土壤物理性质具有差异性。随沙漠化的加剧，土壤容重增大、含水量降低、团聚体不稳定、颗粒组成变粗，造成土地生产力退化、土地资源锐减，进而加剧沙区人民贫困，因此沙地土壤恢复是我国面临的重要任务。而沙地土壤的改善对于植被生长、土壤生产力增加以及生态系统的稳定具有重要意义。然而目前对沙漠化过程中土壤物理性质的研究仍有不足之处，今后可以更加加强对沙漠化的制约、生态环境改善以及土壤特性与植被相互作用的研究，进而对沙地土壤和植被的恢复、及沙漠化整治提供决策参考。

基金项目

内蒙古师范大学研究生科研创新基金项目(CXJJS20122)。

参考文献

- [1] Middleton, N. and Thomas, D.S.G., Eds. (1992) World Atlas of Desertification (United Nations Environment Programme). Edward Arnold, London.
- [2] 韩邦帅, 薛娴, 王涛, 等. 沙漠化与气候变化互馈机制研究进展[J]. 中国沙漠, 2008, 28(3): 410-416.
- [3] 李庆逵. 晚近农业化学的进展[J]. 科学通报, 1953, 2(3): 105-109.
- [4] 陈传信, 张永强, 薛丽华, 等. 伊犁河谷栗钙土区不同产量雨养麦田土壤物理性质比较研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 304-309.
- [5] Lavauden, L. (1937) The Equatorial Forest of Africa: Its Past, Present and Future. *African Affairs*, XXXVI, 3-25. https://doi.org/10.1093/afraf/XXXVI.Supplement_CXLIII.3
- [6] Le Houerou, H.N. (1959) Recherches ecologiques et floristiques sur la vegetation de la Tunisie Meridionale. Algiers: University d'Alger, Institute de Recherches Shariennes, 510.
- [7] Houerou, H.N. (1975) The Nature and Cause of Desertification. *Proceedings of the IGU Cambridge Meeting of Desertification*, Cambridge, 22-26 September 1975.
- [8] Swift, J. (1975) The Political Ecology of Drought and Desertification in Africa. *Proceedings of the IGU Cambridge meeting of Desertification*, Cambridge, 22-26 September 1975.
- [9] UNCOD (1977) Desertification: Its Causes and Consequences. Pergamon Press, Oxford.
- [10] 朱震达. 三十年来中国沙漠研究的进展[J]. 中国沙漠, 1979, 34(4): 305-314.
- [11] 朱震达, 刘怒. 关于沙漠化的概念及其发展程度的判断[J]. 中国沙漠, 1984, 4(3): 2-8.
- [12] 王涛, 赵哈林, 肖洪浪. 中国沙漠化研究的进展[J]. 中国沙漠, 1979, 34(4): 305-314.
- [13] Aubreville, A. (1949) Climare, forest et desertification de l'Afrique tropicale. Societe editions geographiques et coloniales, Patis, 352.
- [14] Giannini, A., Saravanan, R. and Chang, P. (2003) Oceanic Forcing of Sahel Rainfall on Interannual to Interdecadal Time Scales. *Science*, 302, 1027-1030. <https://doi.org/10.1126/science.1089357>
- [15] Barrow, C.J. (1991) Land Degradation. Cambridge University Press, New York, 121-189.
- [16] Zobeck, T.M. and Fryrear, D.W. (1989) Chemical and Physical Characteristics of Windblown Sediment: 1L Chemical Characteristics and Total Soil and Nutrient Discharge. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, 29, 1037-1041. <https://doi.org/10.13031/2013.30266>
- [17] Reynolds, J.F., Virginia, R.A. and Schlesinger, W.H. (1997) Defining Functional Types for Models of Desertification. In: Smith, T.M., Shugart, H.H. and Woodward, F.I., Eds., *Plant Function Types: Their Relevance to Ecosystem Properties and Global Change*, Cambridge University Press, Cambridge UK, 195-216.
- [18] Le Houerou, H.N. (1996) Climate Change, Drought and Desertification. *Journal of Arid Environments*, 34, 133-185. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0099>
- [19] Anaya-Garduño, M. (1977) Technology and Desertification. *Economic Geography*, 53, 407-412. <https://doi.org/10.2307/142983>
- [20] Verstraete, M.M. and Schwartz, S.A. (1991) Desertification and Global Change. *Vegetatio*, 91, 3-13. <https://doi.org/10.1007/BF00036043>
- [21] 杨梅焕, 曹明明, 朱志梅, 等. 毛乌素沙地东南缘沙漠化过程中植被的退化和稳定性[J]. 水土保持, 2010, 30(2): 169-176.
- [22] Moghaddam, M.H.R., Sedighi, A., Fasihi, S. and Firozjaei, M.K. (2018) Effect of Environmental Policies in Combating Aeolian Desertification over Sejzy Plain of Iran. *Aeolian Research*, 35, 19-28 <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.09.001>
- [23] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [24] 熊惠, 鞠山. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1956.
- [25] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 945-950.
- [26] 徐丽恒, 王继, 李毅, 等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J]. 中国沙漠, 2008, 28(4): 690-695.
- [27] 王辉, 任继周, 袁宏波. 黄河源区高寒草地沙化进程中土壤物理性质的变化(简报)——以玛曲为例[J]. 草业学报, 2007, 16(1): 30-33.
- [28] 曹鹤, 薛立, 谢腾芳, 等. 华南地区八种人工林的土壤物理性质[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 620-625.

- [29] 张鼎华, 孙志蓉, 翟明普, 等. 杨树刺槐混交林沙地土壤的水分 - 物理性质[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(2): 122-125.
- [30] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- [31] 汪言在, 苏正安, 周明华. 北方农牧交错带表层土壤孔隙度特征及其影响因素[J]. 草业科学, 2020, 37(7): 1249-1258.
- [32] 惠竹梅, 李华, 张振文, 等. 西北半干旱地区葡萄园生草对土壤水分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 123-126.
- [33] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [34] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 干旱区地理, 2004, 18(3): 53-56.
- [35] 钱洲. 毛乌素沙地飞播造林植被恢复特征及土壤性质变化[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [36] 孟祥楠, 赵雨森, 杨俊, 等. 嫩江沙地人工防风固沙林立地质量变化研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 27-34.
- [37] 王莹, 郑纪勇, 张兴昌, 等. 毛乌素沙区土壤养分对湿地退化的响应[J]. 草地学报, 2009, 17(2): 250-254.
- [38] 王进, 周瑞莲, 赵哈林, 等. 呼伦贝尔沙地和松嫩沙地草地沙漠化过程中土壤理化特性变化规律的比较研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(2): 309-314.
- [39] 红梅, 韩国栋, 赵萌莉, 等. 放牧强度对浑善达克沙地土壤物理性质的影响[J]. 草业科学, 2004, 21(12): 108-111.
- [40] 熊好琴, 段金跃, 王妍围, 等. 栏禁牧对毛乌素沙地土壤理化特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 152-157.
- [41] Su, Y.Z., Zhao, H.L., Zhang, T.H., et al. (2002) Processes and Characteristics of Soil Degradation in Rainfed Farmland in the Horqin Sandy Land. *Journal of Soil Water Conservation*, 16, 25-28.
- [42] 李禄军, 蒋志荣, 车克钧, 等. 绿洲 - 荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 123-127.
- [43] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 不同植被类型沙地表层土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 106-109, 186.
- [44] 赵学勇, 贺丽萍. 科尔沁沙地生态系统典型土壤养分空间分布特征[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 328-332.
- [45] 胡孟春, 刘玉璋, 乌兰, 等. 科尔沁沙地土壤风蚀的风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 1991, 11(1): 22-29.
- [46] 万婷, 涂卫国, 席欢, 等. 川西北不同程度沙化草地植被和土壤特征研究[J]. 草地学报, 2013, 21(4): 650-657.
- [47] 金红喜, 何芳兰, 李昌龙, 等. 玛曲沙化高寒草甸植被、土壤理化性质及土壤微生物数量研究[J]. 草业学报, 2015, 24(11): 20-28.
- [48] 金云翔, 徐斌, 杨秀春, 等. 不同沙化程度草原地下生物量及其环境因素特征[J]. 草业学报, 2013, 22(5): 44-51.
- [49] 闫守刚, 许清涛. 土壤水分对流动沙丘迎风坡与丘间低地过渡带植被入侵的制约[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1611-1616.
- [50] 张旭冉, 张卫青. 土壤团聚体研究进展[J]. 北方园艺, 2020(21): 131-137.
- [51] 苑亚茹. 不同土地利用与施肥管理对黑土团聚体中有机碳的影响[D]: [博士学位论文]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013.
- [52] Canton, Y., Solebenet, A., Asensio, C., et al. (2009) Aggregate Stability in Range Sandy Loam Soils Relationships with Runoff and Erosion. *Catena*, 77, 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.12.011>
- [53] Jastrow, J D. (1996) Soil Aggregate Formation and the Accrual of Particulate and Mineral-Associated Organic Matter. *Soil Biology Biochemistry*, 28, 665-676. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00159-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00159-X)
- [54] 江仁涛, 李富程, 沈淞涛. 不同年限红柳恢复川西北高寒沙地对土壤团聚体和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 197-203.
- [55] 彭云煦, 何谦, 王松. 不同沙化程度高寒草地土壤团聚体有机碳含量特征[J]. 草原与草业, 2019, 31(1): 60-62.
- [56] 曹立悦, 李玉霖, 詹瑾, 等. 开垦对科尔沁沙地土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 212-220.
- [57] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 等. 高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 160-165.

-
- [58] 张继义, 赵哈林. 退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤-植被系统稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1395-1401.
- [59] 吴景贵. 土壤颗粒的功能研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(4): 529-537.
- [60] 李绍良, 贾树海, 陈有君, 等. 内蒙古草原土壤退化进程及其评价指标的研究[J]. 土壤通报, 1997, 28(6): 241-243.
- [61] 朱震达, 陈广庭. 中国沙质荒漠化[M]. 北京: 北京科学出版社, 1994.
- [62] 朱志梅, 杨持, 曹明明, 等. 多伦草原土壤理化性质在沙漠化过程中的变化[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 1-5.
- [63] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲, 等. 内蒙古东部两大沙地土壤理化特性沙漠化演变规律的比较[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 779-786.