

黄土高原土壤旱化研究综述

潘占兵¹, 张 龙^{1,2}, 杨 瑞³, 李生宝¹, 董立国¹, 蔡进军¹

(1. 宁夏农林科学院, 银川 750002; 2. 宁夏大学 农学院, 银川 750021; 3. 永宁县农牧局, 宁夏 永宁 750100)

摘 要:由于半干旱区降水稀少、植被过度耗水、土壤水分蒸发强烈导致土壤长期严重缺水,形成干层。土壤干层一旦形成,极难恢复,并将严重制约该地区的生态发展与经济建设。对土壤干层形成的原因进行了分析,并综述了土壤干层的定义、量化评价方法以及土壤旱化缓解的研究进展,指出当前土壤干燥化定量评价研究中的不足。建议今后应将基于影响植物生长的土壤旱化定量评价指标的建立作为研究方向,并加强基于土壤水分安全承载下的植被构建强度研究,以避免人为加剧土壤旱化的趋势。

关键词:半干旱地区; 土壤旱化; 定量评价; 缓解措施

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0287-05

Overview on Research Progress of Soil Drought in Semiarid Regions of the Loess Plateau

PAN Zhan-bing¹, ZHANG Long^{1,2}, YANG Rui³, LI Sheng-bao¹, DONG Li-guo¹, CAI Jin-jun¹

(1. Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China;

2. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Yongning Center

for Agricultural Technology Extension and Service, Yongning, Ningxia 750100, China)

Abstract: As the result of scarce precipitation, excessive water consumption by vegetation and quick evaporation in semi-arid area, the soil is so dry in a long term that the dry layers formed in the profile. It is difficult to be wetted soon once the dry earth layers occurred, which will cause serious influence on the development of ecological environment and economy. The causes of soil dry layer was analyzed and it's definition was given. The method of quantitative evaluation and reducing drought is also explained. The defect of the soil desiccation quantitative research nowadays was showed. It was suggested that the future research should focus on the research of soil drought evaluation index affecting plant growth, and pay more attention to research for vegetation construction based on soil water security in order to avoid accelerating soil drought caused by human.

Key words: semiarid regions; soil drought; quantitative evaluation; mitigation measure

黄土高原土壤干层是在特殊环境气候下,林草植被长期过度消耗土壤中的水分,使土壤水分接近或达到凋萎湿度,深层土壤水分无法得到补充的一种水文现象^[1],最早于 20 世纪 60 年代至 80 年代由西北水保所土壤水分组在陕西东部旱塬区的蒲城、澄城一带发现^[2]。土壤干层一旦出现,会导致植被稀疏,物种单一,树木难以成才,林草提早衰退,生活周期缩短,天然条件下物种更新受阻,衰败后的地区,人工重新建设难度极大。多年生高耗水性豆科牧草(紫花苜

蓿)连续旱作多年后,土壤水分将不断减少,土壤旱化逐年加重^[3-5],王美艳等^[6]研究发现,半干旱黄土丘陵区苜蓿适宜种植年限以 7 a 最佳。

1 土壤干层的特征及概念

目前土壤干层有两种定义:西北水土保持生物研究所土壤水分组^[2]认为土壤干层是土壤水通过土壤蒸发和植物蒸腾作用,不断逸入大气之中,经过较长时间序列,因土壤水分负补偿效应在土体某一深度所

收稿日期:2012-03-09

修回日期:2012-06-28

资助项目:国家自然科学基金“宁南黄土丘陵区苜蓿地旱化特征及其对土壤养分与微生物的影响”(41061034);宁夏退耕还林工程效益监测与定量评价研究(2008-6);宁夏自然科学基金“宁夏黄土丘陵区苜蓿地旱化评价及其对土壤微生物群落功能多样性的影响”(NZ1172)

作者简介:潘占兵(1975—),男,宁夏自治区惠农县人,助理研究员,主要从事荒漠化防治与生态环境建设方面的研究。E-mail:pan7536@163.com

形成的一层厚度不等的低湿层;侯庆春等^[3]认为土壤干层是位于降水渗层以下,因植物蒸腾导致土壤水分负平衡,形成长期存在的干燥化土层,其土壤湿度处在萎蔫湿度至 75%田间持水量之间。这两种定义多年来一直被诸学者认可并延用至今。李玉山^[7]、杨文治等^[8]认为土壤干层具有如下特征:(1)位于土体的某一深度范围内,一般在降水入渗深度以下;(2)具有相对持久性;(3)具有一定的湿度范围,下限为凋萎湿度,上限为毛管断裂湿度或土壤稳定湿度;(4)干燥化深度与根系分布深度相应,植物根系愈深,干燥深度愈大;(5)干燥化强度因植物种类和生长年限不同而各异,降水量和蒸散量的大小直接影响干燥化程度。根据上述土壤干层的定义以及特征可以得出,土壤干层是在干旱、半干旱区气候持续干旱背景下,因强烈蒸发和植物过度耗水,使降雨入渗深度以下土层水分长期处于严重亏缺状态,且制约植被正常生长或导致死亡的低湿度土层。

2 土壤干层成因的研究进展

半干旱黄土丘陵区土壤干层的形成直接导致土壤退化,植被生长速率缓慢,群落衰败以至大面积死亡,严重制约着该区生态环境建设效果^[9]。故半干旱黄土丘陵区土壤水分研究历来是广大学者关注的焦点。土壤干层除了与干旱少雨的气候背景以及植被耗水有直接关系外,在海拔、小地形、地面组成物质、树种和造林技术等因素的影响下,也发生局部变化。

2.1 气候原因

气候持续干旱是加剧土壤干燥化程度的重要原因^[10-11]。肖军^[12]认为气候变暖干化是酿成土壤干层出现的原因之一。赵景波等^[13]认为气候干旱,气温不断升高,导致土壤蒸发和植物蒸腾作用加剧,土壤水分负补偿效应的长期存在导致土壤干层出现。李裕元等^[14]进一步指出:气候干旱是土壤干层出现的主要原因,人为因素加速了干层的形成。半干旱地区部分土壤层水分可以得到补偿,而得不到补偿的土层水分长期处于一种较稳定的低水平上,这种长期的亏缺需要大量降水才能恢复。这现象在水文环境恶劣的半干旱地区,普遍存在于人工林草地和天然草地。当降雨对土壤水分的补偿量不能满足植被自身生长的需要时,植被必须从土壤中摄取水分,导致土壤水分亏缺。这一状态维持多年后,就会造成土壤含水量下降,引发土壤干层。因此,杜娟等^[15]认为干旱区降水少是土壤干层发生的主要原因,黄土层的厚度和地下水的埋深大小对土壤干层也有影响。张海等^[16]也认为降水少和下渗困难是黄土区形成干层的直接原

因。杜世平等^[17]、刘刚等^[18]依据降水入渗补充深度,将土壤干层划分为临时性干层(0—200 cm)和永久性干层(200 cm 以下)。

2.2 植被原因

植被类型选择不当,种植密度过大,是土壤干层出现的主要原因之一。程积民等^[10]对半干旱地区柠条土壤水分消耗规律的研究表明,随柠条生长年限的延长,土壤含水量逐年下降,土壤水分不断亏缺。植被生长年限短,对土壤水分消耗相对少,在土壤上层出现轻度干层,生长年限越长,根系分布越深,对深层水分的消耗越强烈。李军等^[19]认为,随苜蓿草地生长年限延长,土壤干燥化强度加剧,高耗水苜蓿地土壤湿度明显低于荒草地,故干旱区苜蓿不易长期连作。李玉山^[4]也认为苜蓿多年连作会导致土壤干化,并指出苜蓿产草量越高,耗水量越大,对深层土壤水分利用能力越强。随苜蓿旱作年限的延长,土壤干层厚度向下延伸,干化程度加剧。苜蓿草地土壤干层出现的土层主要在地下 140~500 cm 范围,生长年限低于 6 a(含 6 a)的苜蓿地在 200 cm 以上出现轻度干层;生长年限在 12 a 以上的苜蓿地在 200 cm 土层以下呈现中度干层^[20]。程积民等^[11]也认为苜蓿多年连作会导致土壤干化,土壤干层出现在 200 cm 以下土层;黄土丘陵区退耕地紫花苜蓿土壤水分消耗规律的研究结果表明^[21],在苜蓿生长的第 3 年 100~210 cm 土层出现干层,生长到第 6 年,苜蓿草地开始衰败;半湿润区的苜蓿草地也存在不同程度的土壤干层,土壤干化程度也随苜蓿生长年限的延长逐渐加深^[5],苜蓿生长 6~8 a 后应及时更新;刘沛松^[22]对宁南山区苜蓿草地土壤水分消耗规律的研究结果表明,随着苜蓿生长年限的延长,土壤干层逐渐上移,并且干层厚度呈现减小趋势,但程积民等^[10]研究结果表明,随着紫花苜蓿生长年限的延长,土壤干层厚度向下延伸,干化程度加剧。Saeed 与 El-Nadi^[23]认为水分缺乏导致苜蓿种群密度、茎重和叶面积下降,苜蓿干草产量与土壤水分呈线性相关。

2.3 地势原因

地形影响降雨地面再分配规律,进而导致土壤含水量的差异。王力等^[24]以陕北黄土地区为研究对象,阐述了干层的形成受海拔高度、降水入渗能力的影响,在黄土高原呈明显的垂直分异规律,海拔越高,土壤干化程度越严重;潘占兵等^[25]认为坡向、坡位对苜蓿土壤水分影响较大,苜蓿旱作多年后,土壤干燥化指数 SDI 排序为:上坡>中坡>下坡,且阳坡土壤旱化比阴坡严重;潘占兵等^[26]证明了坡位与种植年限均对土壤水分产生影响,其大小顺序为:3 a 生>7

a 生>19 a 生>11 a 生,土壤干燥化程度随着土层深度的增加而减弱,上坡苜蓿地 0—5 m 土壤平均含水量为 6.34%,明显小于中坡和下坡;何福红等^[27]也认为,同一植被类型由于种植密度、生物量、种植年限、坡度、坡向及坡位的不同,土层旱化程度也不同。牛俊杰等^[28]证明了地形是形成土壤干层的重要因素之一,梁峁地比平川地干化严重。

3 判定与评价土壤旱化的依据

为了定量评价土壤的干燥化程度,有学者将土壤含水量直接作为划分依据,也有学者提出将有效饱和度、干燥化指数综合指标作为土壤干层的划分依据。

3.1 以土壤含水量为依据

杨文治与李玉山等均将土壤干层的上限定为土壤稳定湿度或毛管破裂湿度。杨文治等进一步指出土壤稳定湿度随土壤质地的不同而不同,范围相当于田间持水量的 70%~80%。而王力等^[29]得出延安田间稳定持水量约为 12%,相当于田间最大持水量的 60%,并将土壤含水量低于田间持水量 30% 定为土壤干层的定量判断指标。而李玉山^[30]则认为土壤干层的湿度应介于萎蔫湿度和土壤田间持水量的 75% 之间。郭忠升等^[31]以土壤凋萎系数作为土壤干层的划分标准。以土壤含水量占田间持水量的多少作为土壤干层及其程度或分级的依据。用公式表达为:

$$DSL_i = \theta_i / \theta_{\text{田持}i} \times 100\%$$

式中:DSL_i——i 土层的土壤干层判定指标值;θ_i——i 土层的土壤含水量(m³/m³);θ_{田持i}——i 土层的土壤田间持水量(m³/m³)。也有学者采用对比分析法阐述土壤干层。该方法以低产农田或荒草地土壤水分背景,通过低产农田或荒草地土壤水分含量与林草地相比,判断人工及天然林草植被土壤干层及其程度^[32];或进行长期定位试验,以造林种草初期土壤水分背景揭示深层土壤的干燥化进程。用公式可表示为:

$$DSL_i = \theta_i - \theta_{\text{背景}i}$$

式中:DSL_i——i 土层的土壤干层判定指标值;θ_i——i 土层的土壤含水量(m³/m³)。θ_{背景i}——低产农田或荒草地或造林种草初期土壤 i 土层的土壤含水量(m³/m³)。在利用土壤含水量对土壤干层进行评价时,万素梅等^[33]将黄土高原区土壤干层分为轻度干层(含水量在 9%~11%)、中度干层(含水量在 7%~9%)、重度干层(含水量<7%)三级;王力^[21]根据水分亏缺程度对植被生长的影响状况,也将干层划分为 3 个等级:I 轻度干层,含水量为 9%~12%,对植物生长影响不大,植物基本能正常生长;II 中度干层,含水量为 6%~9%,对植物生长影响较严重,表现为密

度大的林分成林不成材,形成低产林;III 严重干层,含水量在 6% 以下,最低可达死亡湿度,对植物生长影响非常严重,植被处于缺水状态,部分植被已开始枯萎甚至死亡。王力等^[29]也曾将含水量低于 5% 的土层划分为强烈干化土层,将含水量在 5%~8% 的土层划分为中等干化土层,含水量在 8%~10% 的土层划分为弱干化土层。可见,土壤含水量是土壤干层评价的最直观指标,但学术界在用这一指标判断土壤干层时,由于没有形成统一的标准,导致土壤干层范围并不一致。

3.2 以土壤干燥化指数为依据

为了便于描述土壤干燥化强度,杨建军等^[34]提出了土壤干燥化指数 SDI(soil desiccation index)。土壤干燥化指数为某一土层实际土壤有效含水量占该层土壤稳定有效含水量比值的百分数,其含义为某一土层可供植物吸收利用的土壤实际有效含水量占该层土壤正常有效含水量的比重。公式表达为:

$$SDI = (SM - WM) / (SSM - WM) \times 100\%$$

式中:SDI——土壤干燥化指数;SM——土壤湿度;WM——凋萎湿度;SSM——土壤稳定湿度。土壤干燥化指数越小,表明土壤干燥度越高,土壤中可供植被利用的土壤有效含水量就越少。据此将土壤干燥化强度划分为 6 级:(1) SDI>100%,为无干燥化;(2) 75%≤SDI<100%,为轻度干燥化;(3) 50%≤SDI<75%,为中度干燥化;(4) 25%≤SDI<50%,为严重干燥化;(5) 0≤SDI<25%,为强烈干燥化;(6) SDI<0,为极度干燥化。通常旱地土壤能够长期维持的土壤湿度约为田间持水量的 50%~75%。但由于土壤稳定湿度不易获得,且受气候、土壤质地、植被类型等因素的影响较大主要靠经验判断,因此,将土壤湿度作为土壤干层评价的指标获得的干燥化指数仍然值得探究。

3.3 以有效水饱和度为依据

有效水饱和度:有效水饱和度实际是土壤有效储水量和土壤有效水库容的比值,其表达式为:

$$D_i = (\theta_i - \theta_{\text{调萎}i}) / (\theta_{\text{田间}i} - \theta_{\text{调萎}i}) \times 100\%$$

式中:D_i——第 i 土层土壤干层的判定指标,其物理意义是土壤有效水饱和度;θ_i——第 i 土层的土壤含水量;θ_{调萎i}——第 i 土层的土壤凋萎含水量,不同地区,不同土质,土壤凋萎含水量不同;θ_{田间i}——第 i 土层的土壤田间持水量;通过该公式可以计算判断出样点土壤水分是否已经或即将临近土壤干层。段建军^[35]等认为用土壤有效水饱和度作为黄土高原土壤干层判断标准比土壤含水量更可靠,更具有通用性,并将土壤干层按以下标准分为 5 个等级,详见表 1。

表 1 土壤干层分级标准

干层等级	干层程度	有效水饱和度/%	危害
1 级	非干层	>60	植被生长正常,发育良好
2 级	轻度干层	60~40	生长受到抑制,林草生长不良
3 级	中度干层	40~15	生长受严重抑制,林木出现干
4 级	严重干层	15~0	生长受严重抑制,林草开始死亡
5 级	极严重干层	<0	植被严重退化,林草大面积死亡

同样也可以用土壤有效水的不饱和度来判断土壤干层,土壤有效水不饱和度在数值上等于 100%与土壤有效水饱和度的差。

4 缓解土壤旱化的研究

在半干旱区,已被人工林草植被干燥化了的土壤水分生态环境虽然难以得到根本改善,但只要采取恰当的抚育措施,提高下渗率,减少降雨流失,根据当地环境的水分承载力调控造林种草的适宜密度、合理的群落生产力,可以使土壤水分亏缺得到缓减,使植物耗水与环境供水间保持一个相对的平衡状态,从而使群落保持稳定状态。赵景波等^[36]认为,土壤干层的发生原因和发育程度不一样,则土壤旱化恢复措施也应该有差异。李玉山等^[29]根据植物在干层形成中的作用大小,将土壤干层分为利用性干层和地区性干层。程积民等^[37]认为:山地、塬地和川地 500 cm 土层以上土壤水分可恢复到接近种植前的水平,而 500 cm 以下土壤干层恢复极其缓慢,且恢复难度较大;利用型干层,如:沟坡地草场采用沙打旺改良后形成的土壤干层,可采用柠条、沙棘等适生灌木带状混交恢复土壤干层,在沙打旺衰败后易形成较稳定的带状灌木林;在较平缓的梁峁坡地,实行沙打旺与农地宽带间作与轮作后,也可缓解土壤水分亏缺。种植紫花苜蓿形成的利用型干层,是在苜蓿生长到一定年限,在土壤水分负平衡效应长期作用下形成的干层,苜蓿地土壤干层若恢复到 9.8%~15.9%,需要 5 a 时间;方新宇^[38]也证实,苜蓿地 3 a 以上翻耕轮作有利于土壤水分恢复,15 a 以上苜蓿地恢复较困难,需要 8 a 以上。王志强等^[39]认为可采用翻耕轮作恢复土壤干层,并得出苜蓿翻耕 3 a 后 200 cm 土层水分恢复到田间持水量的 62.5%。孙剑^[40]也认为随着苜蓿生长年限的延长,苜蓿草地土壤干层厚度逐渐增加,苜蓿—粮食轮作有利于土壤水分恢复,轮作年限愈长,土壤水分恢复效果越好。同时,丰富草地资源是保持土壤水分最有效最直接的方法,要确保某一地区植被良好生长,起到蓄水保湿作用,必须做到该地区植被种类复杂多样,增加种群物种丰富度。地区性干层主要是在持续干旱的背景下,土壤水分得不到大气降雨补充

而形成的。对于此类干层,可采用水平梯田、反坡水平阶等措施改变降雨地表再分配规律,促进降雨就地入渗,防止和削弱土壤局部干层发生。集水造林便是采用整地措施使降水就地渗入到根际深层土壤,不仅可以防止深层土壤的干燥化,也能促进林木生长。因此,土壤干层出现后需要通过雨季休闲或与耗水量较小的植被轮作、以及提高降雨入渗率均可缓解土壤干层进一步恶化。

对旱化趋势与土壤干层形成的研究,在于了解干层形成过程中土壤水分的变化规律,为提出治理和维护的方法提供有效科学的理论基础。草地严重退化,不仅难以促进畜牧业的发展,而且会导致土壤水库调节功能减弱甚至丧失,土壤水分生态环境恶化。国内外学者在过去的研究中多侧重于天然草地稳定性、演替规律、土壤水分与天然草地生产力关系及天然草地土壤理化性质影响等方面,也有部分学者对土壤物理性质、化学性质的影响等方面进行了研究,其目的之一就在于解决土壤干层逐年加剧的问题。

5 结论与建议

5.1 结 论

土壤干层就是由于水土流失和植被消耗,导致土壤出现一种不易恢复的低湿环境。土壤干层是半干旱地区苜蓿地面临的最为严峻的问题,多年连作导致深层土壤干燥化是植被建设过程中出现的重大生态环境问题。这一严重生态问题的出现除了由该地区常年干旱,有效降雨稀少所致,还因为在人为改造,建设生态环境的过程中,对植被种植的选择不当,高耗水植被选择较多,同时还因为在种植时,种植密度不当所致,天然形成的地势地形,致使降水在地表分布不均匀,也直接导致了局部干旱低湿土壤的形成。

土壤含水量、土壤干燥度指数、土壤有效水饱和度是目前使用较多的三种判定土壤干层的方法,但由于土壤干燥度指数的计算过程中,土壤稳定湿度没有统一标准,主要采用经验值计算;土壤有效水饱和度的计算过程中,土壤凋萎含水量也多采用学者多年的经验值,未曾统一,故由此得到的干层判断标准都有缺陷。

在土壤干层的缓解措施的研究中,学者提出通过改变微地貌,增加降雨在土壤中的汇集与入渗量来缓解土壤旱化程度;同时提出在植被建设中选择低耗水植物,并通过降低植被构建强度来缓解土壤旱化;也可采用轮作方式缓解土壤旱化。

5.2 建议

旱化严重,导致土壤贫瘠,生长力低下,植被死亡,造成群落功能衰退,甚至会导致物种在当地灭绝,这严重制约着土地的健康发展。为此应加强土壤旱化定量评价研究,通过研究土壤旱化程度与抑制植物生长的临界土壤含水量之间的关系,建立基于植物生长的土壤旱化评价体系;尤其要开展基于人工植被建设主要树草种的土壤旱化定量评价研究。

加强基于土壤水分安全承载下的植被构建强度研究。首先通过土壤旱化水分动力学机制的长期定位试验研究,明确土壤旱化形成过程中土壤水分变化特征以及其与气候、地形、植被类型与密度等响应程度,从而揭示土壤旱化的水分动力学机制。其次通过不同土壤含水量条件下植被的耗水规律研究,提出基于土壤水分安全承载下的植被构建强度。

参考文献:

- [1] 杨文治,邵明安,彭新德,等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系[J]. 中国科学,1998,28(4):357-365.
- [2] 西北水土保持与生物研究组. 陕西省东都干旱农地土壤水分调查[J]. 土壤,1975,28(6):279-285.
- [3] 侯庆春,韩蕊莲,韩仕峰. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探[J]. 中国水土保持,1999(5):11-14.
- [4] 李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报,2002,39(3):404-411.
- [5] 朱香凝,郭继勋,梁存柱,等. 华北平原地区灌溉对苜蓿产量及土壤水分的影响[J]. 中国草地,2002,24(6):32-37.
- [6] 王美艳,李军,孙剑,等. 黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化特征与粮草轮作土壤水分恢复效应[J]. 生态学报,2009,29(8):4528-4534.
- [7] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [8] 杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [9] 王力,邵明安,侯庆春. 延安试区土壤干层现状分析[J]. 水土保持通报,2000,20(3):35-37.
- [10] 程积民,万惠娥,王静,等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. 林业学报,2005,41(2):37-41.
- [11] 程积民,万惠娥,王静. 黄土丘陵区苜蓿生长与土壤水分变化[J]. 应用生态学报,2005,16(3):435-38.
- [12] 肖军,赵景波. 黄土高原地区土壤干层综合研究[J]. 固原师专学报:自然科学版,2005,26(6):58-61.
- [13] 赵景波. 淀积理论与黄土高原环境演变[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [14] 李裕元,邵明安. 黄土高原气候变迁、植被演替与土壤干层的形成[J]. 干旱区资源与环境,2001,5(1):2-77.
- [15] 杜娟,赵景波. 长安少陵塬全新世以来的土壤侵蚀规律研究[J]. 中国沙漠,2004,24(1):63-70.
- [16] 张海,王延平,高鹏程,等. 黄土高原坡地土壤干层形成机理及补水途径研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):162-164.
- [17] 杜世平,王留芳,龙明秀. 宁南山区旱地紫花苜蓿土壤水分及产量动态研究[J]. 草业科学,1999,16(1):12-17.
- [18] 刘刚,王志强,王晓岚. 吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析[J]. 水土保持研究,2004,11(1):126-129.
- [19] 李军,陈兵,李小芳,等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报,2007,27(1):75-89.
- [20] 王俊,刘文兆,李凤民. 半干旱区不同作物与苜蓿轮作对土壤水分恢复与肥力消耗的影响[J]. 土壤学报,2004,44(1):179-183.
- [21] 王力,邵明安,侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. 水土保持学报,2000,14(4):87-90.
- [22] 刘沛松. 宁南旱区苜蓿草地土壤水分消耗规律及粮草轮作土壤水分恢复效应研究[J]. 土壤肥料科学,2005,21(9):270-274.
- [23] Saeed I A M, EI-Nadi A H. Irrigation effects on the growth, yield, and water use efficiency of alfalfa[J]. Irrigation Science,1997,17(2):63-68.
- [24] 王力,邵明安,王全九,等. 黄土区土壤干化研究进展. 农业工程学报,2004,20(5):27-31.
- [25] 潘占兵,余峰,王占军,等. 宁南黄土丘陵区坡向、坡位对苜蓿地土壤含水量时空变异的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(2):141-144.
- [26] 潘占兵,李生宝,蔡进军,等. 宁南山区苜蓿地土壤水分和养分变异规律研究[J]. 水土保持通报,2011,31(2):61-67.
- [27] 何福红,黄明斌,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J]. 自然资源学报,2003,18(1):30-35.
- [28] 牛俊杰,赵景波,王尚义. 论山西褐土区农田土壤干燥化问题[J]. 地理研究,2008,27(3):519-526.
- [29] 王力,邵明安,侯庆春,等. 延安试区人工刺槐林地的土壤干层分析[J]. 西北植物学报,2001,21(1):101-106.
- [30] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报,2001,38(3):353-356.
- [31] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报,2003,23(8):1640-1647.

更新世白龙江流域泥石流沉积物的硅铝系数 3.43 左右,而小江流域泥石流沉积物的硅铝系数为 3.85~3.46。

白龙江流域与小江流域第四纪泥石流沉积物硅铝系数相同的变化规律,显示了第四纪时期两个地区气候总体波动的一致性,即气候波动的总体趋势是干燥程度逐渐增加。从以上不同时代、不同地区泥石流沉积物的硅铝系数变化规律可以看出,泥石流沉积物的硅铝系数对环境的指示特征与风化壳及洞穴堆积物相反,气候温暖湿润,硅铝系数大,反之,硅铝系数小,其原因与泥石流流体中 SiO_2 与 Al_2O_3 的富集过程有关。

6 结论

青藏高原东缘第四纪泥石流沉积物中主要化学元素含量在不同地区及不同时代剖面上的变化显示出一定的规律性:泥石流流体中 SiO_2 含量表现为时代越老含量越高; Al_2O_3 含量表现为时代越老含量越低; K_2O 含量表现为时代越老越低,时代越新越高。泥石流沉积物中 CaCO_3 的含量在早更新世的泥石流流体中含量高,在晚更新世含量越低;有机质含量从早更新世到晚更新世,随着气候逐渐的干冷,含量明显减少。第四纪泥石流沉积物可溶盐具有以下变化规律: HCO_3^- 有由老到新逐渐增加的趋势; Cl^- 随着温湿条件变化而变化,温湿条件好 Cl^- 含量减少,反之增多;间冰期湿气候条件下形成的泥石流堆积物中 SO_4^{2-} 含量偏低,而冰期时形成的泥石流沉积物中 SO_4^{2-} 含量偏高。

泥石流沉积物的硅铝系数对环境的指示特征与风化壳及洞穴堆积物相反,气候温暖湿润,硅铝系数大,反之,硅铝系数小,其原因与泥石流流体中 SiO_2 与

Al_2O_3 的富集过程有关。白龙江流域与小江流域第四纪泥石流沉积中硅铝系数相同的变化规律,显示了第四纪时期两个地区气候波动的总体趋势是干燥程度逐渐增加。

参考文献:

- [1] 田连全,康志成,张有富,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [2] 吴积善,康志成,田连全,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [3] 崔之久. 泥石流沉积与环境[M]. 北京:海洋出版社,1996.
- [4] Tiranti D, Bonetto S, Mandrone G. Quantitative basin characterization to refine debris flow triggering criteria and processes: an example from the Italian Western Alps [J]. Landslides, 2008, 5(1): 45-57.
- [5] Jomelli V, Brunstein D, Grancher D, et al. Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal A case study in the Massif des Ecrins (French Alps) [J]. Climatic Change, 2007, 85(1/2): 119-137.
- [6] 李吉均,况明生. 小江流域第四纪沉积物的 ESR 年代、山原红壤发育年龄与地层划分的研究[C]//“八五”攀登计划青藏高原项目. 1995 年学术年会论文集. 兰州:兰州大学出版社,1995: 64-78.
- [7] 李永化,赵军,崔之久,等. 青藏高原东缘和邻区晚新生代泥石流活动规律及其成因[J]. 地理研究, 2002, 21(5): 561-567.
- [8] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1989.
- [9] 刘东生. 黄土的物质成分和结构[M]. 北京:科学出版社, 1996.
- [10] 谢又予. 以沉积学方法论“北京猿人”生活时期的古气候[J]. 地理科学, 1982, 2(4): 319-325.
- [32] 王国梁,刘国彬,常欣. 黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 339-344.
- [33] 万素梅,贾志宽,王勇,等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及氮素消耗研究[J]. 自然资源学报, 2008, 23(3): 383-390.
- [34] 杨建军,李会科,张广军,等. 黄土高原土壤干层减缓方法初探[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 186-190.
- [35] 段建军,王小利,张彰霞,等. 黄土高原土壤干层评定指标的改进及分级标准[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 151-154.
- [36] 赵景波,李瑜琴. 陕西黄土高原土壤干层对植树造林的影响[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 370-373.
- [37] 程积民,程杰,高阳. 半干旱区退耕地紫花苜蓿生长特性与土壤水分生态效应[J]. 草地学报, 2011, 19(4): 565-569, 576.
- [38] 方新宇,李军,王学春,等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干燥化与草粮轮作水分恢复效应[J]. 中国农业科学, 2010, 43(16): 3348-3356.
- [39] 王志强,刘宝元,路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1944-1950.
- [40] 孙建,李军,王美艳,等. 黄土高原半干旱偏旱区苜蓿粮食轮作土壤水分恢复效应[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 33-39.

(上接第 291 页)