

黄土高原主要土壤成壤过程 与矿物元素再分配

贾 恒 义

中国科学院
水 利 部 水土保持研究所·陕西杨陵·712100

黄土高原深厚的黄土层中的黄土—古土壤序列是环境变迁的轨迹。250 万年以来黄土—古土壤序列所提供的气候变化信息,引起研究者颇多。黄土—古土壤序列所反映的环境变迁的背景,以及生物气候变化紧密相关连的成壤过程,提供了生物气候与土壤变迁的轨迹。

朱显谟先生是我国黄土高原土壤、土壤侵蚀及黄土—古土壤研究的奠基人之一。他开创了黄土高原土壤的研究工作。他的学术思想对推动我国的土壤成壤过程的研究和土壤分类,都有重要的影响和指导意义。

朱先生在 1956 年发表的“黄土区土壤侵蚀的分类”一文中,在总结群众经验的基础上,根据黄土区的生物气候特点及土壤剖面特征与有关性质,提出黄土高原地带性土壤——黑垆土。它在全国一、二次土壤普查,全国土壤系统分类和黄土地层(或黄土地质)中被应用。

朱先生积多年塬土的研究,于 1964 年出版“塬土”专著。他对塬土的形成、分类及其生产特性等方面都有深入研究。在以施用土粪而形成 $\geq 50\text{cm}$ 覆盖层的塬土是人为生产劳动创造的而有别于地带性的古老耕种土壤,它不但在我国,而且在世界土壤发生分类上都有重要位置。此种土壤连同我国的其他土壤都被世界土壤资源参比基础(WRB)的确认与应用^[31]。

朱先生近些年来在成壤过程的机理,生物在成壤过程的腐殖质的累积,矿物作用,粘化作用,粘土矿物的形成,元素的淋溶淀积,迁移富集和反馈等有重要论述^[2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14],他这些开拓性观点,为今后土壤成壤过程的研究奠定了基础。

多年我在朱先生的领导下,对黄土高原土壤发生进行一些研究工作,取得了一些重要意义的研究成果。据此,初步认为黄土高原的土壤在生物气候作用下,成壤过程中矿物元素发生淋溶淀积、迁移富集,受作用力的不同而发生再分配,它在农业耕作、医学地理及环境科学等方面都有重要理论价值和实用意义,谨以此祝贺朱显谟先生从事土壤科学研究 55 周年暨 80 寿辰!

1 黄土高原土壤的主要成壤过程

黄土高原土壤的成壤过程是在生物气候环境下土壤发生发育的物理、化学、物理化学、生物化学、生物过程内在或外在的综合表现,它是连接成壤条件与土壤特性的纽带。按成壤过程的作用特点,其在自然条件下,主要有淋溶淀积、粘化、腐殖质化过程等,在人为作用下主要有塬化(或堆垫),灌淤及其他等方面的作用。

1.1 淋溶淀积过程

淋溶淀积是一个过程的两个方面,实际是个自然过程,影响其元素的减少(某一层段)与增加(某一层段)。二价元素 Ca^{++} 、 Mg^{++} 主要以碳酸钙形式存在,则成为淋溶淀积的主要对象。 CaCO_3 淋溶强度及淀积深度主要受降水量的制约,一般而言,降水量较多,淋溶强度大,淀积的深度较大,反之则小。但是在黄土高原土壤成壤过程受降尘作用影响大,不同地区则有显著差异。在塋土、粘化黑垆土的堆垫表层或其他土壤的堆垫表层有复淋溶淀积现象,它成为堆垫表层的主要特征之一。就是剥蚀严重的黄绵土在表层也有淋溶现象。碳酸盐淀积的形态有假菌丝体、菌膜、根管状和石灰结核。石灰结核因降水量等因素的影响也有不同大小和形态。在黄土高原土壤还有 NO_3-N 的淋溶淀积,一般灰钙土地区淋溶淀积浅,而在黑垆土、塋土地区淋溶淀积深,但 NO_3-N 的特殊淋溶淀积已不是土壤发生发育的特征性指标,而成为 NO_3-N 淋溶淀积的污染系统中的指标。

1.2 粘化过程

粘化过程即是原生矿物风化转化为次生粘土矿物或生物作用形成和原生矿物进一步变细的过程。它的强度常用粘粒的含量和次生铝硅酸盐的种类、数量为指标的。黄土高原的土壤,粘化层不仅粘粒含量高,矿物元素、有机质含量也高,而且易溶性盐类含量则相反,故黄土高原土壤腐殖质层、淋溶层与粘化层溶为一体是一致的,形成“残积粘化”。粘粒要分散到水中方可移动。粘粒中可分散到水中的主要是粘土矿物,而黄土区土壤中粘土矿物中主要是伊利石和少量蛭石等;伊利石亲水力较差(其膨胀度为 2.5%,比高岭石还小),加上土壤是偏碱性的,且为 Ca 、 Mg 等盐基所饱和,大部分土壤还有 CaCO_3 。伊利石和蛭石絮凝的可能性很大,特别是在 Fe^{+++} 、 Al^{+++} 存在的情况下,所以从移动的条件上看,粘粒移动的可能性不大。

由于腐殖质层和淋溶层与粘化层的一致及较强的生物风化作用和强烈的生物反馈作用,不仅此层呈红褐色—红棕色,并有一定数量的胶膜,而且有一些元素淋失与大量元素的富集,正因如此,此层的出现与地质学有密切的关系。黄土高原土壤的粘化程度表现为由西北向东南逐渐增强的趋势,蛭石、蒙脱石等也有类似的趋势。蛭石在此层的增加成为特征性的次生粘土矿物。

从土体构型方面来说,此层呈现深度不一对农林果业生产性能一定产生不利的影响。

在黄土高原由于降尘,人为施用土粪,引浑灌淤和其它方面等因素都可使粘化过程受阻而形成有利于农业的“黄盖塋”的土体构型。

1.3 腐殖化过程

黄土深厚疏松,有利于根系下扎;同时黄土的降尘从未间断。所以在生物与降尘共同作用下使有机质累积层深达 0.2~1.0m 或者 1.0m 以上。含量在 8~20 之间,多于钙结合,并以薄膜包裹于土粒或块团表面。因降尘与矿化作用常表现为:厚度北部深厚,东南、南部次之;矿化作用,北部小于东南、南部。

黑垆土腐殖质层是在蒿属植物 (*Artemisia. sp*) 白羊草 (*Bothriochlor ischaemum*) 草甸草原植被下形成的,形成年代 5 000~8 000 年。塋土是在森林草原植被(褐土形成层段)及人工栽培作物(塋化层)下共同形成的,年代一般在 2 500~12 700 年。

腐殖层因累积、矿化的速率与强度的分异,在剖面呈现颜色有所不同,黑垆土 4.5~3.5/3.5,塋土 4.5~5.0/3.5。黑垆土腐殖质中,胡敏酸与富啡酸之比大于 2.0,而塋土则为 1.2~1.5,甚至在 1.0 以下,说明了胡敏酸由北向南在芳化度上有逐渐降低的同时,分子量也逐渐变小。植物 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 的比值在 5.68~44.77,影响 SiO_2 的累积^[23]。

1.4 楼化过程

楼化过程是在确立了中国古老耕种土壤之一——楼土后而提出的。它是指在褐土或相似土壤上施用土粪(土粪是这一地区的圈粪、坑粪、老墙土的总称,一般含土在70.0%以上,土来自居民点的周围土壤),不断耕作并使耕作层逐渐增厚上移而形成 $\geq 50\text{cm}$ 堆垫表层,并使其分化为耕作层、犁底层、老耕层、古耕作层等,叠加土厚土壤剖面之上的上具有双淋淀剖面特征的土壤。它形成具有“黄盖楼”的土体构型。此概念的提出不仅在汾渭盆地的土壤成壤过程和分类上有重要理论价值和应用意义,而且在我国褐土地区(冀、鲁、豫、辽等省(市))“黄盖楼”土体构型土壤上,乃至世界土壤系统分类中被采纳和应用^[5,30]。楼化过程使其地带性的淋溶淀积、粘化等过程受阻或减缓,使其成为“黄盖楼”的土体构型土壤,改变了成壤过程中矿物元素再分配与循环,土壤水分运行等,并使土壤既发小苗,又发老苗,更有利于耕作保墒,防止板结龟裂等。

此种土壤在良好的生态环境条件下,是我国农业开发历史悠久地区之一,也是我国粮(冬小麦)、棉、油和农林牧业名、优、土特产的生产基地与盛产区。

1.5 引浑灌淤过程

引浑灌淤从公元前432年西门豹的漳水十二渠,到陕西赵老峪引洪灌淤区,秦郑国渠,乃至今天我国北方多泥沙河流的引浑灌淤,它可以改良河滩洼地沙地,扩大耕地,改良盐碱地,增加土壤养分,是利用河流泥沙,兴利除害之事^[17,20,26,27]。

长期引浑灌淤,落淤与耕作等交替进行,形成一定厚度的灌淤层土壤。它的剖面颗粒组成、碳酸钙等均一,是一种良好的耕种土壤之一。

1.6 原始成土过程

原始成土过程大约有岩面微生物的“定居”和“岩漆”的形成;岩生植物地衣的着生和演变以及薄层风化壳的形成;苔藓植物的定居和细土层的形成等。从岩漆到 A_0 、 A 层,由岩岩在生物的作用下发生剖面层的分异,形成具有一定层的土壤。在原始成土过程中先是“岩漆”其次是地衣、苔藓,并向草甸化过渡。始终有生物的参与。

淋溶淀积、粘化、腐殖质化过程一般而言是自然过程,它的强弱与速度受生态环境的制约,是自然环境的轨迹。楼化、灌淤过程则主要受人们生产活动的影响,自然成壤过程受阻或者改变了成壤方向,它明显区别于地带性土壤或区域性土壤,是人类生产活动与文明历史的土壤学轨迹。

2 黄土高原主要成壤过程与矿物元素的再分配

每种土壤的成壤过程受两个或两个以上成壤过程的作用,但每种土壤成壤过程则有主导的过程,同时黄土高原各种土壤有共同的过程仅仅是强度而各异。由于成壤过程不同及生态环境的差异,其土壤元素的地球化学过程、含量与发展的趋势已不尽相同。为了叙述方便起见,以土类简述于下。

2.1 黑垆土

黑垆土是在暖温带大陆季风气候条件,夏季高温多雨,水热同步;秋季温和湿润,土壤湿度大;冬季寒冷低温。此种气候条件不仅有利草甸草原植物的生长发育,而且有利于植被的枯枝落叶及根系的累积与腐解。在微小的降尘作用参与下逐渐累积并上移而形成深厚的腐殖层。其矿物或有机元素在剖面分布规律是:

(1)造岩元素。主要是Si、Al、Ca、Mg、K、Na等,系成岩石的主要元素,黄土中这6种元素的氧化物含量约占70.0%,或者更高,常因淋溶淀积、迁移富集等及矿物种类、粘土矿物等不同有

所分异。

碱土金属元素 Ca、Mg 在剖面上分布特点:Ca 含量在 12.9~119.9g/kg 之间,其含量呈钙积层>母质层>耕作层>腐殖质层;Mg 含量 13.1~39.5g/kg,剖面分布与 Ca 有所相似^[15,18]。

碱金属 K、Na,在剖面分布特点:K 含量在 19.2~29.9g/kg,其含量呈腐殖质层或者耕作层高,而母质层低的分布^[19,21]。土壤非代换性钾含量在 813.3~1 407.7mg/kg,在剖面分布指数回归 $y = Ae^{-bx}$,初步认为它是草原地带黑垆土的主要发育特征之一^[21],同时土壤非代换性钾在剖面中 1~5m 中有个大的“低谷”,最低在 3.0m 左右^[24]。从非代换性钾在剖面的变化可以看出钾素迁移富集的过程及其分布特点。Na 在剖面含量 7.0~21.6g/kg,呈耕作层或母质层、钙积层高于腐殖质层。从 Na 的移动性上说比钾强,但不及钙移动明显^[18]。

Si、Al 含量 591.2~714.7g/kg,以腐殖质层或耕作层表现为高^[18]。虽然 Si、Al 在剖面的变化受 Ca^{++} 的影响,但仍表现为腐殖层高的特点。

(2)P 的含量在 1.02~1.41g/kg,以母质层>耕作层>腐殖质层的分布特点,它与 Ca 在剖面分布形态相类似^[18]。

(3)据研究铁族、亲铜、稀土和放射性元素等都与腐殖质层的累积密切相关^[15]。

2.2 塋土

塋土是在褐土上长期施用土粪、耕作与栽培作物等不断迭加而形成具有堆垫表层与具有双淋淀层段的耕种土壤。上部为堆垫表层,一般 ≥ 50 cm,其中包括耕作层、犁底层、老耕作层或古耕作层等,受生产活动的影响,营养元素上移。原褐土中的腐殖质层、粒化层与淋溶层的一致,使一些元素淋溶而大部分元素的富集。故塋土的矿物元素再分配不同于黄土高原的其它土壤。

(1)造岩元素。碱土金属元素 Ca、Mg 在剖面的含量与分布特点:Ca 在土壤中常以 $CaCO_3$ 的形式存在的,其含量在 1.2~170.5g/kg,在剖面中不仅含量高,而且不同层次相差十分悬殊,呈现剖面上下部高、中部低的分布特征^[25]。堆垫表层系施用土粪或富含 Ca 的成土母质而成的,中部低,中下高是碳酸钙淋溶淀积的结果。另外剖面 Ca、Mg 盐基饱和程度,也影响其它元素的迁移、富集。

Mg 在剖面的含量 15.2~24.9g/kg,堆垫表层 16.6~24.9g/kg,堆垫下层 18.3~25.1g/kg,碳酸盐淀积层和母质层为 15.0~20.4g/kg,总体而言,Mg 在剖面虽有分异,但变幅较小^[25]。

K、Na 在剖面上的含量分别是 22.9~30.8g/kg,15.1~19.8g/kg,堆垫表层分别是 25.5~27.8g/kg,15.4~19.8g/kg,堆垫下层分别是 24.4~30.8g/kg,16.0~19.2g/kg,碳酸盐淀积层和母质层分别为 20.7~28.4g/kg,16.6~20.0g/kg。就全钾的含量而言,即为堆垫表层下层>堆垫表层>碳酸盐淀积层和母质层,在堆垫表层也有分异^[19,25]。土壤非代换性钾在剖面含量为 583.0~1 569.0g/kg,堆垫表层为 956.0~1 476.0g/kg,且呈表层高于下层的分布;堆垫表下层为 1 040.0~1 569.0g/kg;碳酸盐母质层 583.0~918.0g/kg。非代换性钾在塋土剖面分布呈现:

$$y = ae^{bx}(c + d\cos \frac{2\pi(x-e)}{f})$$

式中: y 为非代换性钾含量; x 为深度(cm); b 为非代换性钾含量随土壤深度的指数变化率; c 为非代换性钾的平均含量; e 为初相位; f 为非代换性钾含量随深度变化的波动周期。

此方程反映了塋土成壤过程的特点,也反映了堆垫表层堆垫过程中非代换性钾迁移富集的特点。非代换性钾还与气候波动有关^[22,28,29]。

从黑垆土、塋土非代换性钾在剖面的分布形态,较为确切的反映了这两种土类的成壤过程

及再分配的特点。因此可以以矿物元素的某种形态作为成壤过程中迁移富集及其再分配,也是全量测定和表示远远不能及的,因此在研究矿物元素在成壤过程中迁移富集,淋溶淀积中测定方法与形态是值得进一步研究与确立,对推动成壤就有重要的作用。

Na 的迁移性>K,受土壤水分蒸发和下渗的影响,因生态环境与地下水位的深浅而有差异,但仍有两种分布状况,即堆垫表层,淀积层,母质层高,堆垫表层低;反之则上,下层低,堆垫表下层高。

P 是弱移动元素^[15],但是生物吸收强度的元素。塿土剖面含量在 1.026~5.89g/kg 呈现堆垫表层>碳酸盐淀积层、母质层>堆垫表下层^[25]。这与 Ca—P 为主要形态,占全 P 的 60.0% 以上有直接关系。故 Ca、P 在剖面分布形态有相似之处。

Si、Al 是弱移动元素,在剖面中含量在 503.3~700.4g/kg,107.9~156.3k/kg,一般呈现堆垫表下层>堆垫表层>碳酸盐淀积层、母质层,对 Si 来说也有例外,在低洼地上 Si 的分布呈另外的形态^[25]。

(2)铁族,亲铜族,稀土和放射元素在剖面的分布一般是堆垫表下层>堆垫表层>碳酸盐淀积层与母质层^[15]。

3 黄土高原成壤过程研究的展望

“成壤”一词在土壤学、黄土地质或地层学中出现仅有几年,它与“成土”有区别,又有联系。它把“成壤”过程与土类的研究推向了新的阶段。并用于“生物聚钙”,“富硅化”,“粘化”与“生物次生粘土矿物”等论点^[1,12,13,14]。

新思路、新论点,必要新的研究方法手段使它变成客观体。传统的一些研究方法、手段要更新改造以适应新的研究需要。

从目前土壤学中研究方法、手段中以某些元素特定的形态进行借鉴可能收到良好的效果,但仍需进行艰苦努力,方可在这方面有突破性进展。

参考文献

- 1 刘东生.黄土与环境.北京科学出版社,1985
- 2 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类.土壤学报,1956,4(2)
- 3 朱显谟.陕西太白山岩生植物与原始成土过程.土壤学报,1963,11(1)
- 4 朱显谟.关于黄土层中红层问题的讨论,第四纪研究,1958,1()
- 5 朱显谟.塿土.北京农业出版社,1964
- 6 朱显谟.中国黄土性沉积物的古土壤.第四纪研究,1965,4
- 7 朱显谟.论原始土壤的成壤过程.中国科学院,1983,(B)10()
- 8 朱显谟.中国黄土初探.第四纪研究,1990,(3)
- 9 朱显谟.试论中国黄土高原土壤与环境.土壤学报,1992,29(4)
- 10 朱显谟.黄土土壤能成为一个独立土纲吗?.土壤通报,1993,24(1)
- 11 朱显谟.强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究.水土保持学报,1993,7(3)
- 12 朱显谟.黄土—土壤结构型的形成及其重要意义.水土保持学报,1994,8(2)
- 13 朱显谟.中国土壤科学复兴之道.水土保持研究,1994,1(1)
- 14 朱显谟.中国黄土高原古土壤中粘粒移动问题探讨.土壤学报,1994,31(4)
- 15 田均良,彭祥林.黄土高原土壤地球化学,北京科学出版社,1994

(下转第 68 页)

这一时期主要成就是肯定了钾肥在黄土区的肥效,同时建立了长期定位试验并取得初步研究结果。80年代以来,钾肥开始大面积应用并不断扩大,1985年黄土高原地区钾肥(K_2O 、下同)施用量达23 311t,至1990年增至39 926t,增加了16 615t,年均3 323t。

根据黄土区土壤养分含量、作物对各类化肥的反映,对耕地需要氮磷钾的程度进行粗略估计,黄土区土壤氮素含量绝大多数不丰,为保持农业生产持续增长,几乎所有耕作土壤都需补给氮肥,缺磷土壤分布比较分散,虽然近年磷肥施用较多,但有机肥用量相对减少,需要补充磷肥的耕地面积将不少于1/2,黄土区钾素含量丰富,只有局部土壤常因氮磷肥施用过多而钾素相对不足,或者栽培需钾较多、对钾敏感的作物、蔬菜、果树需要补充钾肥,需要施钾耕地面积将不超过1/5。

参考文献 46 篇略

(上接第60页)

- 16 席承藩. 土壤分类学. 北京农业出版社, 1994
- 17 贾恒义. 中国古代引浑灌溉的研究. 农业考古, 1984, (1)
- 18 贾恒义. 土壤资源. 见: 黄土高原杏子河流域自然资源与水土保持. 陕西科学技术出版社, 1986
- 19 贾恒义. 黄土区非代换性钾与土壤发育的关系. 土壤学报, 1988, 25(4)
- 20 贾恒义. 北京引浑灌溉初步研究. 农业考古, 1989, (1)
- 21 贾恒义. 黑垆土非代换性钾剖面分布特征的研究. 水土保持通报, 1990, 10(3)
- 22 贾恒义. 接土非代换性钾剖面分布模型与系统分类. 水土保持通报, 1994, 14(3)
- 23 贾恒义. 黄土高原蒿属植化学元素特征. 西北植物学报, 1995, (2)
- 24 贾恒义等. 黄土高原黑垆土地区土壤矿物元素的地化学特征. 地理科学
- 25 贾恒义等. 堆垫旱耕人为土的地球化学特征. 土壤学报
- 26 贾恒义. 中国古代人为土的形成. 农业考古
- 27 贾恒义. 黄土高原灌溉土的初步研究. 水土保持通报
- 28 贾恒义. 黄土高原土壤钾素迁移富集与土壤生态环境. 1995 西北农业大学 60 校庆论文集
- 29 贾恒义. 黄土地层古土壤非代换性钾与古气候波动
- 30 赵景波. 西北黄土区第四纪土壤与环境. 陕西科学技术出版社, 1994
- 31 龚子同. 面向 21 世纪的土壤地理学. 土壤学进展, 23(1)