

转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性

石辉

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 团聚体稳定性是土壤的基本性质,反映了土壤肥力的高低。在 3 个合理假设的基础上,通过建立干筛和 Yoder 法湿筛结果之间的转移矩阵,并通过不同径级团聚体的保存率构造了团聚体稳定性指数。该稳定性指数与文献结果具有良好的一致性,说明了转移矩阵方法可用于土壤团聚体稳定性的评价。同时利用该方法分析了不同径级团聚体抗破裂能力大小,发现降雨模拟、干湿循环(1 次)、干湿循环(10 次)和 Yoder 湿筛法影响的团聚体粒径并不相同。 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量虽然在整体上与团聚体的稳定性具有良好的相关性,但并不是随着 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量的增高,每个径级范围的团聚体稳定性增强。该方法可充分利用团聚体分析所得的信息,为进一步认识土壤团聚体的稳定性提供方法支撑。

关键词: 土壤团聚体; 转移矩阵; 团聚体稳定性指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2006)03-0091-05

中图分类号: S152.4

Using Transition Matrix to Evaluate Stability of Soil Aggregates

SHI Hui

(Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi Province, China)

Abstract: Soil aggregate stability is a key property of soil, and reflects soil fertility. Soil aggregate stability index (ASI) was formed through the transition matrix between dry sieving results and Yoder method results, and conserving-probability of each size aggregate on the basis of 3 reasonable assumptions. The ASI is identical to the result by references, which shows that the transition matrix can be used to evaluate the soil aggregate stability. The transition matrix was then used to analyse anti-break ability of different size aggregates. Results show that there are difference effects for each size aggregate with 4 methods of simulation rainfall, wetting-drying cycles one time, wetting-drying cycles ten time, and Yoder wet sieving. There is a good linear relationship between content of more than 0.25 mm water stable aggregate and ASI in a total tendency, but not all size aggregate stability heightenes with > 0.25 mm water stable aggregate content increasing. The transition method utilizes all information of aggregate analysis, and can be a better tool to understand soil aggregate.

Keywords: soil aggregate; transition matrix; aggregate stability index

土壤团聚体的大小和含量是土壤重要的物理性质,其稳定性的大小反映了抵抗外力破坏的能力^[1],已成为土壤质量高低和抗侵蚀能力强弱的主要指标。一般研究土壤团聚体的稳定性主要采用湿筛法^[2-3]。该方法主要反映了 0.25~10 mm 大团聚体的一些综合性质,而对各个团聚体粒径变化的反映并不敏感。但是由于不同粒径团聚体在物理化学性质上存在差异^[4-6],致使团聚体的破裂参数与其粒径分布密切相关^[7]。因此,考虑到团聚体分布性质的一些参数被用于团聚体粒径性质的描述,如重量平均粒径(MWD)^[8]、几何平均粒径(GMD)^[9]及对数正态分布^[10];而这些参数主要用于区别不同土壤和土地

利用情况下土壤团聚体的大小而没有和团聚体的稳定性联系起来。不同大小的土壤团聚体之间存在一定的自相似形,因此分形理论被广泛的应用于土壤团聚体的研究^[11-16]。而有关分形理论主要集中于不同耕作方式、轮作方式和土地利用情况下的分形维数计算,以及分维数对各种耕作方式的敏感性评价等方面^[17],和团聚体的稳定性联系并不是特别紧密。

由于土壤经常处于自然含水量的条件下,与风干土具有一定的相似性,因此直接对风干土过筛的干筛法得到的团聚分布同样能表征团聚体的特征,因此用干筛法的结果表征土壤团聚体的性质也得到了广泛应用^[18],风干团聚体抵抗雨滴破坏的能力反映了土

收稿日期: 2005-11-23

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB11502); 国家重点基金项目(30230290)

作者简介: 石辉(1968—),男(汉族),陕西省眉县人,博士,教授,主要从事环境生态学方面的教学研究工作。E-mail: shihui@xauat.edu.cn.

壤抗侵蚀能力的强弱^[19],对风干团聚体进行湿筛的过程实质上是一个能量输入的过程^[20],输入的能量超过风干团聚体之间的凝聚力使得团聚体破裂。因此,综合考虑风干团聚体和水稳性团聚体以及它们之间的转化过程,形成一种既可反映能量输入的动力过程,又可反映单个团聚体的破裂情况的稳定性指标对于认识团聚体的稳定性有重要的意义。

如果把风干土的团聚体和水稳团聚体分别作为 2 个矩阵,则可以通过转移矩阵建立起两者之间的联系,转移矩阵的一些特征就可反映出团聚体的稳定性。因此,本文希望采用这种转移矩阵方法评价团聚体的稳定性,从而解决过去稳定性评价指标的不足。

1 基本原理和假设

对于风干团聚体,假设 i 个粒径范围的风干团聚体百分数构成一个输入矩阵 M_i :

$$M_1 = \{M_1, M_2, M_3, M_4, \dots, M_i\} \quad (1)$$

湿筛后的水稳性团聚体,相应 i 个粒径范围的百分数可构成一个输出矩阵 N_i :

$$\begin{cases} M_1 X_1 = N_1 \\ M_1(1-X_1)X_1 + M_2 X_2 = N_2 \\ M_1(1-X_1)(1-X_2)X_3 + M_2(1-X_2)X_3 + M_3 X_3 = N_3 \\ \dots\dots \\ M_1(1-X_1)(1-X_2)\dots(1-X_{i-1})X_i + M_2(1-X_2)\dots(1-X_{i-1}) + \dots + M_i X_i = N_i \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)写成矩阵形式为:

$$\begin{pmatrix} x_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ (1-x_1)x_2 & x_2 & 0 & \dots & 0 \\ (1-x_1)(1-x_2)x_3 & (1-x_2)x_3 & x_3 & \dots & 0 \\ \dots\dots & & & & \\ (1-x_1)(1-x_2)\dots(1-x_{i-1})x_i & \dots & & & x_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \dots \\ M_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ \dots \\ N_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

如果令:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ (1-x_1)x_2 & x_2 & 0 & \dots & 0 \\ (1-x_1)(1-x_2)x_3 & (1-x_2)x_3 & x_3 & \dots & 0 \\ \dots\dots & & & & \\ (1-x_1)(1-x_2)\dots(1-x_{i-1})x_i & \dots & & & x_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

则: $XM = N$ (6)

式(6)中矩阵 X 为一个转移矩阵,通过保存几率和破裂几率将风干土和水稳性团聚体联系起来。如果某个粒径范围内的保存几率 X_1 越大,说明在湿筛这个能量输入过程中该粒级的团聚体越不容易破坏,稳定性越强。

针对整个土壤来说,可用各个径级的保存几率综合出一个团聚体的稳定指数(Aggregate Stability In-

$$N = \{N_1, N_2, N_3, N_4, \dots, N_i\} \quad (2)$$

根据团聚体形成的一些理论,小的团聚体通过无机胶体、黏粒和有机物质的胶结作用使小的团聚体形成大的团聚体,但这需要一个相对较长的时间。因此,可形成下面几个合理的假设。

(1) 在进行团聚体筛分的过程,只能是大的团聚体分散形成小的团聚体,小的团聚体结合为大的团聚体是不可能事件。

(2) 大的团聚体在筛分变成小的团聚体过程中,假设每次只能破裂到下一级的筛径,这样经过连续的筛分,可开成等效应的结果^[21]。

(3) 无论是上个筛径破裂形成下个筛径的团聚体,还是本身为这个筛径的团聚体,凡具有相同筛径的团聚体具有相同的破裂几率。

如果团聚体筛径大小的顺序为 1, 2, 3, 4 …… i , 大于每个筛径的团聚体在筛分时保存在自己筛径范围内的几率为 $X_1, X_2, X_3, X_4 \dots\dots X_i$ 。破裂后进入下一筛径的几率则为 $1-X_1, 1-X_2, 1-X_3, 1-X_4, \dots\dots 1-X_i$, 则可在 M_i 和 N_i 之间建立起下面的关系:

dex, ASI)。从数学上讲,最简单的一种方法是将各个保存几率相乘,以其乘积作为 ASI,但对于比较大的 10~ 5 mm 团聚体,在能量输入水筛时有可能彻底破坏,这样组成的 ASI 为 0,不能进行土壤之间的比较,因此我们采用各径级保存几率的和作为土壤团聚体稳定性指标,实质上是转移矩阵 X 对角线上元素之和:

$$ASI = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_i \quad (7)$$

2 土壤团聚体稳定性指标的验证和评价

在文献[22],也提出了一种计算团聚体稳定性的方法,且具有详细的土壤团聚体径级组成资料,以这些资料作为验证和评价的主要资料来源。

验证的土壤为 Haplic Phaeozem, Mollic Gelysol 和 Orthic Rendzina, 主要采用降雨模拟方法^[23], 干湿循环方法^[24]和传统的湿筛^[25]确定土壤团聚体的稳定性,各种方法测定的土壤团聚体组成见表1。

根据上述假设和方程(3),可计算出各个径级范围团聚体的保存率见表2。由于 < 0.25 mm的径级是最小的粒径,在干团聚体湿筛的过程中不可能再破坏为其下一个径级,因此其保存率为1.000,其余各个径级的团聚体均在湿筛过程中有破坏,因此其保存率均小于1.000。对于 Haplic Phaeozem 土壤, > 0.25 mm的团聚体范围内,降雨模拟方法对10~5 mm的团聚体影响最大,其保存率为0.556,对3~1 mm的团聚体影响最小,保存率为0.771;干湿循环1次,对5~3 mm的团聚体影响最大,其保存率为0.529,对0.5~0.25 mm的团聚体影响最小,保存率为0.696;干湿循环10次,对5~3 mm的团聚体影响最大,其保存率为0.227,对0.5~0.25 mm的团聚体影响最小,保存率为0.513;而湿筛,10~5 mm的团聚体全部破坏,5~3 mm的团聚体保存率为0.107,0.5~0.25 mm团聚体的保存率为0.364。

Mollic Gelysol 土壤, > 0.25 mm的团聚体范围内,降雨模拟方法同样对10~5 mm的团聚体影响最大,其保存率为0.318,对1~0.5和0.5~0.25 mm的团聚体具有相同的影响,保存率为0.773;干湿循环1次,5~3 mm的团聚体保存率降低,为0.400;对0.5~0.25 mm的团聚体影响最小,保存率为0.800;干湿循环10次,对5~3 mm的团聚体的保存率降为0.231,0.5~0.25 mm的团聚体降为0.780;而湿筛,10~5 mm的团聚体保存率剧烈下降,仅为0.091,0.5~0.25 mm团聚体的保存率也下降为0.579。

Orthic Rendzina 土壤,降雨模拟方法对0.5~0.25 mm的团聚体影响最大,其保存率为0.667,3~1 mm的团聚体的保存率为0.880;干湿循环1次,5~3 mm的团聚体保存率降低,为0.591,对0.5~0.25 mm的团聚体影响最小,保存率为0.900;干湿循环10次,对10~5 mm的团聚体的保存率为0.393,0.5~0.25 mm的团聚体降为0.567;而湿筛法,10~5 mm的团聚体保存率也剧烈下降为0.071,1~0.5 mm团聚体的保存率也下降为0.465。

总体而言,不同的处理方法对土壤团聚体的影响不一,干湿循环1次和降雨模拟方法对土壤团聚体的破坏相对较小,而传统的Yoder湿筛方法对土壤团聚体的破坏最大,保存率最低。对于3种土壤,均是Yoder湿筛法稳定性指数最小,而模拟降雨和干湿循环1次的稳定性指数较高。

表1 不同研究方法下的 Haplic Phaeozem, Mollic Gelysol 和 Orthic Rendzina 土壤团聚体组成

土壤	处理	土壤团聚体组成/mm					
		10~5	5~3	3~1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25
Haplic Phaeozem	干筛	0.18	0.10	0.28	0.16	0.10	0.18
	降雨模拟	0.10	0.11	0.27	0.18	0.11	0.23
	干湿循环(1次)	0.11	0.09	0.22	0.17	0.16	0.25
	干湿循环(10次)	0.06	0.05	0.17	0.15	0.20	0.37
	Yoder 湿筛法	0	0.03	0.13	0.11	0.20	0.53
Mollic Gelysol	干筛	0.22	0.10	0.19	0.13	0.17	0.19
	降雨模拟	0.07	0.13	0.22	0.17	0.17	0.24
	干湿循环(1次)	0.12	0.08	0.18	0.13	0.24	0.25
	干湿循环(10次)	0.06	0.06	0.14	0.14	0.32	0.28
	Yoder 湿筛法	0.02	0.06	0.13	0.13	0.22	0.35
Orthic Rendzina	干筛	0.28	0.11	0.23	0.14	0.11	0.13
	降雨模拟	0.24	0.13	0.22	0.13	0.10	0.18
	干湿循环(1次)	0.17	0.13	0.23	0.14	0.18	0.15
	干湿循环(10次)	0.11	0.10	0.18	0.18	0.17	0.26
	Yoder 湿筛法	0.02	0.10	0.21	0.20	0.14	0.33

表 2 Haplic Phaeozem, Mollic Gelysol 和 Orthic Rendzina 土壤团聚体的保存几率及稳定性指数

土壤	处理	土壤团聚体组成 / mm						稳定性指数 ASI
		10~ 5	5~ 3	3~ 1	1~ 0.5	0.5~ 0.25	< 0.25	
Haplic Phaeozem	降雨模拟	0.556	0.611	0.771	0.750	0.688	1.000	4.376
	干湿循环(1次)	0.611	0.529	0.611	0.567	0.696	1.000	4.014
	干湿循环(10次)	0.333	0.227	0.378	0.341	0.513	1.000	2.792
Mollic Gelysol	Yoder 湿筛法	0.000	0.107	0.245	0.196	0.364	1.000	1.911
	降雨模拟	0.318	0.520	0.710	0.773	0.773	1.000	4.093
	干湿循环(1次)	0.545	0.400	0.581	0.500	0.800	1.000	3.826
Orthic Rendzina	干湿循环(10次)	0.273	0.231	0.359	0.368	0.780	1.000	3.019
	Yoder 湿筛法	0.091	0.200	0.512	0.382	0.579	1.000	2.764
	降雨模拟	0.857	0.867	0.880	0.765	0.667	1.000	5.036
Orthic Rendzina	干湿循环(1次)	0.607	0.591	0.719	0.609	0.900	1.000	4.426
	干湿循环(10次)	0.393	0.357	0.439	0.486	0.567	1.000	3.242
	Yoder 湿筛法	0.071	0.270	0.420	0.465	0.412	1.000	2.638

田积莹先生^[26]对土壤毛细管水浸润 30 min, 在水中上下振荡 30 次(1 min) 的邱林法, 土壤未经毛细管水浸润在水中上下振荡 30 次(1 min) 的振荡法以及 Yoder 湿筛法进行了比较, 发现 Yoder 湿筛法稳定性团聚体的含量最低, 也就是说该方法得到的稳定性指数最小, 这与我们上述分析结果具有一致性。

从表 2 中还可以看出, 不同的方法破坏团聚体的径级不同。Yoder 湿筛法主要破坏 10~ 5 mm 和 5~ 3 mm 这 2 个径级的团聚体; 相对而言, 对 1~ 0.5 mm 和 0.5~ 0.25 mm 的团聚体影响较小; 干湿循环 10 次与 Yoder 湿筛法相似, 主要破坏 10~ 5 mm 和 5~ 3 mm 这 2 个径级的团聚体, 但对保存率影响较小的仅有 0.5~ 0.25 mm 这一个径级的团聚体; 干湿循环 1 次主要影响的是 5~ 3 mm 这一个径级的团聚体, 3~ 1 mm 和 0.5~ 0.25 mm 径级的团聚体影响较小; 而模拟降雨方法对各个团聚体的影响几乎相等。

文献^[22]同样给出了不同方法下的土壤团聚体稳定性指数, 将文献值和我们得到的稳定性指数进行比较(图 1), 发现它们具有良好的一致性, 文献值和估计值之间的 R^2 为 0.9736, 说明了转移矩阵方法估计的土壤团聚体稳定性具有良好的精度。

对 Yoder 湿筛法得到的 > 0.25 mm 团聚体含量与转移矩阵得到的团聚体稳定性指数之间的关系进行了研究, 发现它们之间具有良好的一致性(图 2), 说明了用 > 0.25 mm 水稳定团聚体含量表示团聚体的稳定性有其合理的一面。但对不同径级团聚体的稳定性与 > 0.25 mm 团聚体含量的关系进一步分析, > 0.25 mm 团聚体含量的高低与 10~ 5 mm, 5~ 3 mm 和 1~ 0.5 mm 团聚体的保存率大小趋势一致, 表

现出一定的相关性; 而与 3~ 1 mm 和 0.5~ 0.25 mm 2 个径级的团聚体保存率趋势相反(图 3), 说明了 > 0.25 mm 团聚体含量的高低并不能说明每个径级范围的团聚体稳定性的高低。

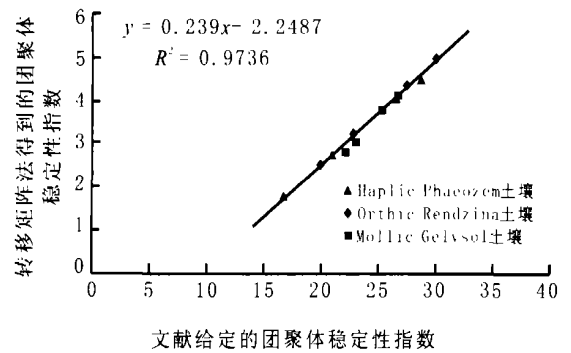


图 1 文献给定的土壤团聚体稳定性指数与转移矩阵法估计的稳定性指数的关系

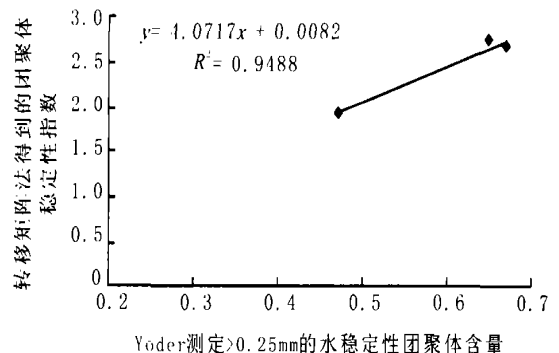


图 2 Yoder 法测定 > 0.25 mm 水稳定性团聚体含量与转移矩阵法稳定性指数之间的关系

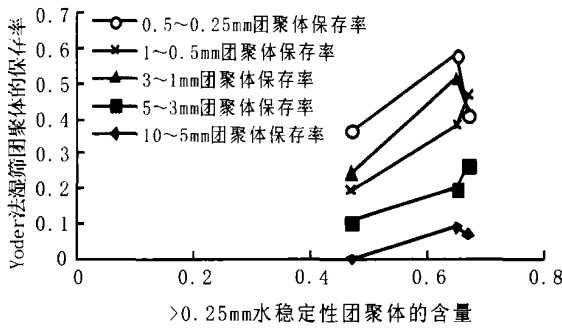


图3 > 0.25 mm 水稳定性团聚体含量与各个径级团聚体保存率之间的关系

3 结论

转移矩阵法得到的土壤团聚体稳定性指数与文献结果相比具有良好的一致性,说明了转移矩阵方法可用于土壤团聚体稳定性的评价。该方法还可提供不同径级团聚体抗破裂能力大小的信息,降雨模拟、干湿循环(1次)、干湿循环(10次)和Yoder湿筛法影响的团聚体粒径并不相同。> 0.25 mm 水稳性团聚体含量虽然在整体上与团聚体的稳定性具有良好的相关性,但并不是随着> 0.25 mm 水稳性团聚体含量的增高,每个径级范围的团聚体稳定性增强。转移矩阵法为进一步认识土壤团聚体的稳定性提供了一种方法支撑。

[参 考 文 献]

[1] Hillel D. Introduction to soil physics[M]. Academic Press, 1982.

[2] Kemper W D, Chepil W S. Size distribution of aggregates [M]. In: Black C A(ed.). Methods of soil analysis. Part I. Agronomy. No.9. ASA, Madison, WI. 1965. 499—510.

[3] 土壤物理性测定委员会编. 土壤物理性质测定法[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社. 1979. 81—88.

[4] 陈恩凤. 土壤肥力物质基础及其调控[M]. 北京: 科学出版社. 1990.

[5] Cambardella C A, Elloit E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregate from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1993, 57: 1071—1076.

[6] Cruvinel P E, Flochini R G, Crestana S, et al. Studying the influence of the aggregate sizes on some elements of an Oxisol with PLXE Soil Sci[J]. 1993. 155: 100—104.

[7] Rogowski A S, Noldenhauer W C, Kirkham D. Rupture parameters of soil aggregates[J]. Soil Sci. Soc. Am Proc. 1968, 32: 720—724.

[8] Van Bavel C H M. Mean weighted diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1949, 14: 20—23.

[9] Mazurak A P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates[J]. Soil. Sci. 1950, 69: 135—148.

[10] Gardner W R. Representation of soil aggregate size distribution by a logarithmic-normal distribution[J]. Soil Sci. Soc. Am Proc. 1956, 20: 151—153.

[11] Anderson A N, McBratney A B. Soil aggregates as mass fractals[J]. Aust. J. Soil Res. 1995, 33: 757—772.

[12] Perfect E, Rasiah V, Kay B D. Fractal dimensions of soil aggregate size distribution calculated by number and mass [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1992, 56: 1407—1409.

[13] Perfect E, Blevins R L. Fractal characterization of soil aggregation and fragmentation as influenced by tillage treatment[J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61: 890—900.

[14] Rasiah V, Kay B D, Perfect E. New mass-based model for estimating fractal dimension of soil aggregates[J]. Soil Sci Soc Am, J, 1993, 57: 891—895.

[15] Young I M, Crawford J W. The fractal structure of soil aggregates: its measurement and interpretation [J]. J. Soil Sci. 1991, 42: 187—192.

[16] 吴承桢. 不同经营模式土壤团聚结构的分形特征研究 [J]. 土壤学报. 1999, 36(2): 162—167.

[17] Figueira R R, Fournier L L, Sarli G O, et al. Sensitivity of fractal parameters of soil aggregates to different management practices in a practices in a Phaeozem central Argentina[M]. Soil Tillage Res. 1999, 52: 217—222.

[18] Hillel D. Environmental soil physics [M]. Academic Press. 1998.

[19] Mbagmu J S C, Bazzoffi P. Soil characteristics related to resistance of breakdown of dry soil aggregates by water-drops[M]. Soil Tillage Res. 1998, 45: 133—145.

[20] Perfect E, Kay B D. Fractal theory applied to soil aggregate[J]. Soil Sci Soc. Am. J. 1991, 55: 1552—1558.

[21] Christopher T B S, Mokhtaruddin A M, Husni M H A, et al. A simple equation to determine the breakdown of individual aggregate size fraction in the wet-sieving method [J]. Soil Tillage Res. 1998, 45: 287—297.

[22] Niewczas J, Witkowska Walsczak B. Index of soil aggregates stability as linear fraction value of transition matrix elements[J]. Soil Tillage Res. 2003, 70: 121—130.

[23] Debicki R, Pawlowski M, Rejman J, et al. A new approach to the design of nozzle-type rainfall simulator[J]. Int. Agrophys. 1993, 7: 197—201.

[24] Walsczak R, Witkowska Walsczak B. Effect of wetting-drying cycles on the aggregation of soil Reczniki Gleboznawcze[J]. 1981, XXXII(3): 37—44.

[25] Yoder R. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion loesses[J]. J. Am. Soc. Agron. 1936, 28(5): 337—351.

[26] 田积莹. 土壤颗粒, 团粒结构和土壤肥力[M]. 见: 朱显谟主编. 黄土高原土壤与农业, 北京: 农业出版社. 1989. 197—226.