

# 土地利用方式对雅江中游土壤理化性质及颗粒分形特征的影响<sup>①</sup>

梁博<sup>1,2</sup>, 林田苗<sup>3</sup>, 任德智<sup>4</sup>, 聂晓刚<sup>1,2</sup>, 万丹<sup>1,2\*</sup>, 喻武<sup>1,2</sup>, 赵薇<sup>1</sup>

(1 西藏农牧学院资源与环境学院, 西藏林芝 860000; 2 西藏农牧学院高寒水土保持研究中心, 西藏林芝 860000;

3 水利部水土保持植物开发管理中心, 北京 100038; 4 成都市农林科学院林业研究所, 四川温江 610000)

**摘要:** 采取野外调查和室内试验相结合方法, 分析了雅江中游 4 种土地利用方式基本理化性质, 并运用土壤颗粒体积分形维数模型研究了不同土地利用方式土壤颗粒分形特征及与土壤粒径、性状关系。结果表明: 不同土地利用方式 0~30 cm 土壤理化性质差异显著( $P<0.05$ ), 土壤容重表现为稀疏灌丛>农耕地>荒草地>人工林地, 随着土壤层次增加, 土壤容重呈增大趋势。总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水率、毛管持水率均与容重规律相反; 4 种土地利用方式主要以粉粒、砂粒为主, 黏粒含量仅占到 0.36%~4.27%, 土壤质地偏砂性; 0~30 cm 土壤颗粒体积分形维数平均值的顺序为: 农耕地>荒草地>人工林地>稀疏灌丛。人工林地具有较好的土壤结构, 相对疏松、通透性好。而稀疏灌丛受到砾石影响, 分形维数最小, 但在保水保肥能力上最弱; 土壤颗粒体积分形维数与砂粒体积百分含量呈极显著负相关( $r=-0.873, P<0.01$ ); 与粉粒体积百分含量呈极显著正相关( $r=0.860, P<0.01$ ); 与黏粒体积百分含量呈极显著正相关( $r=0.913, P<0.01$ )。这表明, 一定程度上, 研究区分形维数可作为评估水土流失的指标; 土壤颗粒体积分形维数与各土壤单一物理性质具有不同程度相关性, 其中与总孔隙度、毛管孔隙度、饱和含水量、毛管含水量均为正相关关系, 而与容重、有机质呈负相关关系。

**关键词:** 土地利用方式; 土壤理化性质; 体积分形维数; 土壤颗粒

**中图分类号:** S153; S152.3 **文献标识码:** A

土地利用方式是引起自然面貌和生态系统功能及结构改变的重要因素, 不合理的土地利用会降低土壤表面覆盖度, 造成土壤结构不稳定、通透性较差、地表径流增加和土壤侵蚀严重等后果<sup>[1-2]</sup>。目前, 土地利用与覆被变化是全球变化研究的热点问题<sup>[3]</sup>。对于土壤自身来说, 其内部的物理、化学、生物等过程的相互影响以及各种地质过程和人为措施的干扰, 其形态、结构、功能等方面表现为复杂的自然体, 但却是有着自相似结构的多孔介质, 具有一定的分形特征<sup>[4]</sup>。土壤颗粒是土壤结构形成的基础物质, 土壤粒径分布常常被用来分析和预测土壤的物理性质如持水量、容重、渗透率和孔隙度等<sup>[5]</sup>。因此, 利用土壤粒径分形维数反映土壤颗粒的分布状况及质地的均一程度<sup>[6]</sup>, 在很大程度上推动土壤形态、过程等复杂问题的解决, 也为量化分析土壤结构与功能提供了有效的研究工具<sup>[4,7]</sup>, 从而使对土壤质地、特性的描述更为简单。自

从 Arya 和 Paris<sup>[8]</sup>及 Turcotte<sup>[9]</sup>对土壤颗粒的分形现象及其分形维数的计算方法进行了研究, 更多学者均致力于对其方法的改进, 我国学者杨培岭等<sup>[6]</sup>以土壤颗粒的质量分布直接计算粒径分布的分形维数, 以此表征土粒直径的大小和质地组成均匀程度。使得分形维数可直接利用常规的机械组成的分析方法所得数据进行计算。王国梁等<sup>[10]</sup>在已有的公式模型基础上, 提出了土壤颗粒体积分形维数的概念, 并不断被更多学者应用于土壤分形特征的实际研究中。因此, 利用已有的土壤分形维数的计算方法, 对研究土壤粒径分布、分形维数反映土壤质地差异、估算土壤其他理化性质及制定水土保持措施等方面产生了重要的意义<sup>[11]</sup>。

日喀则地区以山区丘陵为主, 由于成土条件影响, 植被覆盖率较低, 土壤侵蚀沟发达, 风沙大。加之人口增长, 人地矛盾日益突出, 土地沙化严重, 已成为西藏水土流失严重的地区之一。近几十年有大

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661061)和西藏自治区自然科学基金厅校联合基金项目(2016ZR-NY-04)资助。

\* 通讯作者(wandan9250@126.com)

作者简介: 梁博(1991—), 男, 陕西韩城人, 硕士研究生, 主要从事高寒区土壤侵蚀机理研究工作。E-mail: qq88aa@yeah.net

量学者对该区土壤进行过研究,然而,这些研究大多集中在土地沙化以及土壤肥力等方面<sup>[12-16]</sup>,而以土壤颗粒分形维数来反映土壤质地差异及土壤基本物理性状的研究目前仍较少有报道。因此本文以日喀则市 4 种典型的土地利用方式为研究对象,分析其基本理化性状,并利用土壤颗粒分形维数反映土壤质地差异,探讨其与理化性质间的关系,从而为日喀则地区土壤质量评价及土地资源优化提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于日喀则市东北方向,雅鲁藏布江中游河谷地带,地理坐标为 88°54'~89°30'E、29°17'~29°59'N,平均海拔 3 840 m,属高原温带半干旱气候,气候温和,年平均气温在 2.4~8.2℃,极端最高气温 28.2℃,极端最低气温 -25.1℃,无霜期 250 d 左右。辐射较

强,日照时间长,年平均达 3 300 h。年均降水量为 433.2 mm,降水主要集中在雨季(5—9 月),尤以 7、8 月份降水最多,占全年降水的 90% 以上;旱季降水较少,为每年 10 月至次年 5 月间,降水量不到全年降水的 10%。土壤砾石含量丰富,以砂质土壤为主。

### 1.2 样品采集

供试土壤样品于 2016 年 4 月 20—21 日,在日喀则市周边地区采集农耕地(CL)、人工林地(AF)、荒草地(WG)、稀疏灌丛(SS)4 种典型土地利用类型(表 1)。选取地形因子相近的地块,在每个地块设置 3 个 5 m×5 m 样方,每个样方采用“S”形采样法选取 3 个土壤剖面。每个剖面分 0~10、10~20、20~30 cm 3 个层次分别采集 1 kg 左右原状土及一个 100 cm<sup>3</sup>环刀土样,将同一个样方同一层原状土样带回,按其纹路轻掰为直径 1 cm 左右土块自然风干并混合,密封保存备用。共计风干样品 36 个,环刀土样 108 个。

表 1 样地基本状况  
Table 1 Basic situations of tested plots

样地	地理位置	海拔(m)	坡度(°)	主要植物种类	郁闭度/盖度	pH	人为干扰
人工林地 AF	88°55.388'E, 29°18.994'N	3 840	1	藏川杨、银白杨	0.60	8.20±0.17	较弱
荒草地 WG	88°54.827'E, 29°17.817'N	3 827	3	蜀葵、紫羊茅、草地早熟禾	0.35	7.60±0.89	较强
农耕地 CL	88°55.388'E, 29°18.994'N	3 861	1	青稞、油菜	-	8.27±0.15	强
稀疏灌丛 SS	89°30.482'E, 29°58.664'N	3 908	5	砂生槐、中国沙棘、藏白蒿等	0.50	8.37±0.06	弱

注:藏川杨(*Populus szechuanica* Schneid. Var. *tibetica* Schneid.); 银白杨(*Populus alba* L.); 蜀葵(*Althaea rosea* (Linn.) Cavan.); 紫羊茅(*Festuca rubra* L.); 草地早熟禾(*Poa pratensis* L.); 砂生槐(*Sophora moorcroftiana* (Benth.) Baker); 中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis*); 藏白蒿(*Artemisia younghusbandii* J. R. Drumm. ex Pamp.); 青稞(*Hordeum vulgare* Linn. var. *nudum* Hook. f.); 油菜(*Brassica napus* L.)

### 1.3 样品处理

自然风干混合的土壤样品仔细剔除植物细根等杂质。风干土壤研磨后,过 2 mm 筛,采用激光粒度仪测定土壤机械组成。土壤有机质的测定采用硫酸-重铬酸钾加热法<sup>[17]</sup>。土壤容重、孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)、饱和持水率、毛管持水率测定采用环刀法<sup>[18]</sup>。

### 1.4 土壤颗粒分形维数计算方法

土壤颗粒粒径分布体积分形维数的求解模型采用王国梁等<sup>[10]</sup>提出的计算公式:

$$\left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} = \frac{V(\lambda < \bar{R}_i)}{V_0} \quad (1)$$

式中: $V(\lambda < \bar{R}_i)$ 为粒径小于 $\bar{R}_i$ 的土粒颗粒总和, $\lambda$ 为特征尺度; $V_0$ 为各级土粒体积总和; $R_{\max}$ 为最大粒级的平均粒径; $\bar{R}_i = (R_i + R_{i+1})/2$ ;  $D$ 为分形维数。对公式(1)求解,首先通过分析确定土壤颗粒的粒径小于某一级别的土粒含量,然后分别以 $\log\left[\frac{V(\lambda < \bar{R}_i)}{V_0}\right]$ ,

$\log\left[\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}}\right]$ 为纵、横坐标,在坐标系上绘出散点图,并进行线性回归分析,则其拟合直线的斜率值即为 $(3-D)$ ,从而推算出土壤颗粒分形维数 $D$ 。

### 1.5 数据处理

所得数据采用 Excel 2016 进行基础统计及制表,采用 SPSS 17.0 进行方差分析、回归分析及制图。

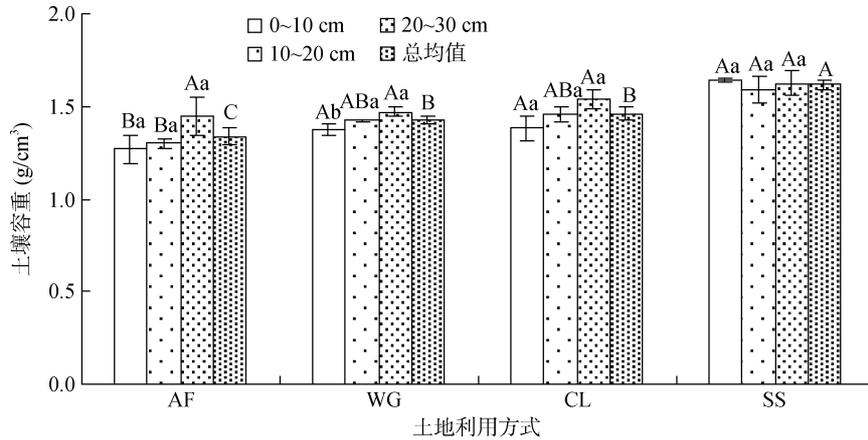
## 2 结果与分析

### 2.1 不同土地利用方式土壤基本理化性质

**2.1.1 土壤容重与孔隙度** 土壤容重和孔隙度综合反映土壤紧实程度及持水性能,并在一定程度上反映了土壤肥力的高低<sup>[19-21]</sup>。由图 1 可知,4 种土地利用方式土壤容重总均值差异显著( $P < 0.05$ )。SS 土壤容重(1.62 g/cm<sup>3</sup>)显著大于其余 3 种土地利用方式( $P < 0.05$ );其次为 CL(1.46 g/cm<sup>3</sup>)、WG(1.42 g/cm<sup>3</sup>),CL、WG 差异不显著( $P > 0.05$ );AF 最小(1.34 g/cm<sup>3</sup>),相比前 3 种土地利用方式,其容重分别减小了 17.28%、

8.22%、5.63%。不同土地利用方式 3 个层次土壤容重均表现为 SS>CL>WG>AF，其中 0~10 cm 土层，CL、WG、AF 3 种土地利用方式差异不显著( $P>0.05$ )；10~20 cm 土层 AF 显著小于 SS( $P<0.05$ )；20~30 cm

土层 4 种土地利用方式土壤容重差异均不显著( $P>0.05$ )。从土壤垂直角度来看，同一土地利用方式不同土层间土壤容重差异均不显著( $P>0.05$ )，但除 SS 外均表现为随土层的加深而增大。



(图中小写字母不同表示同一土地利用方式不同土层间差异显著( $P<0.05$ )；大写字母不同表示同一土层不同土地利用方式及总均值差异显著( $P<0.05$ )，下同)

图 1 不同土地利用方式土壤容重

Fig. 1 Soil bulk densities under different land use types

由表 2 可知，不同土地利用方式土壤总孔隙度、毛管孔隙度总均值变化范围分别是 34.27%~46.56%、30.56%~42.80%。两个指标均表现为 AF、WG 土壤显著大于 CL、SS( $P<0.05$ )，但在 AF、WG 两种土地利用方式上差异不明显( $P>0.05$ )，两个指标具体表现为 AF>WG>CL>SS。在不同土地利用方式 3 个土层上，两个指标均表现为 AF>WG>CL>SS，与容重呈相反的变化规律。其中，0~10 cm 土层 AF、WG 总孔隙度、

毛管孔隙度均显著大于 SS( $P<0.05$ )，而 CL 与其余 3 种土地利用方式差异均不显著( $P<0.05$ )；10~20 cm 土层 4 种土地利用方式间的总孔隙度、毛管孔隙度差异均不显著( $P>0.05$ )；20~30 cm 土层总孔隙度 AF 与 SS、CL 与 WG 差异显著( $P<0.05$ )，毛管孔隙度 SS 显著小于前 3 种土地利用方式( $P<0.05$ )。说明，良好的植被郁闭度及较少的人为干扰，一定程度上，能够减小土壤容重，增加土壤孔隙，从而使土壤变得疏松。

表 2 不同土地利用方式土壤物理性质特征

Table 2 Characteristics of soil physical properties under different land use types

土地类型	土层(cm)	总孔隙度(%)	毛管孔隙度(%)	非毛管孔隙(%)	饱和含水量(g/kg)	毛管含水量(g/kg)
AF	0~10	48.71 ± 2.14 Aa	44.47 ± 1.54 Aa	4.25 ± 0.61 Aa	386.69 ± 3.97 Aa	352.79 ± 3.29 Aa
	10~20	47.46 ± 1.40 Aa	43.71 ± 1.38 Aa	3.76 ± 0.03 Ba	365.72 ± 1.87 Aa	336.79 ± 1.79 Aa
	20~30	43.51 ± 2.51 A Ba	40.22 ± 2.72 Aa	3.29 ± 0.22 Ab	303.79 ± 3.95 Aa	281.06 ± 3.93 Aa
	总均值	46.56 ± 1.36 A	42.80 ± 1.21 A	3.76 ± 0.24 B	352.07 ± 2.19 A	323.55 ± 1.96 A
WG	0~10	45.79 ± 0.20 Aa	41.44 ± 0.21 Aa	4.36 ± 0.41 Aa	333.02 ± 0.88 Aa	301.28 ± 0.52 Aa
	10~20	45.58 ± 0.36 Aa	41.23 ± 0.32 Aa	4.36 ± 0.16 Aa	320.73 ± 0.42 ABa	290.08 ± 0.06 ABa
	20~30	44.83 ± 0.19 Aa	40.13 ± 0.24 Ab	4.70 ± 0.43 Aa	305.22 ± 0.38 Ab	273.30 ± 0.62 Ab
	总均值	45.40 ± 0.22 A	40.93 ± 0.27 A	4.47 ± 0.17 A	319.65 ± 0.58 A	288.22 ± 0.57 A
CL	0~10	42.23 ± 5.16 ABa	38.34 ± 4.86 ABa	3.90 ± 0.31 Aa	308.45 ± 5.24 ABa	280.06 ± 4.29 ABa
	10~20	40.91 ± 1.71 Aa	37.24 ± 1.80 Aa	3.68 ± 0.09 Ba	282.11 ± 2.12 ABa	256.88 ± 2.10 ABa
	20~30	36.89 ± 2.80 BCa	33.24 ± 3.04 ABa	3.66 ± 0.24 Ab	240.52 ± 2.29 Aa	216.81 ± 3.29 Aa
	总均值	40.01 ± 2.19 B	36.27 ± 2.04 B	3.74 ± 0.11 B	277.03 ± 2.23 B	251.25 ± 2.13 B
SS	0~10	32.79 ± 1.51 Ba	29.16 ± 1.22 Ba	3.63 ± 0.29 Aa	199.82 ± 1.05 Ba	177.72 ± 0.86 Ba
	10~20	36.24 ± 5.52 Aa	32.62 ± 5.48 Aa	3.63 ± 0.05 Ba	230.49 ± 4.54 Ba	207.58 ± 4.40 Ba
	20~30	33.79 ± 1.27 Ca	29.90 ± 0.87 Ba	3.89 ± 0.40 Aa	208.72 ± 1.60 Aa	184.66 ± 1.27 Aa
	总均值	34.27 ± 1.65 C	30.56 ± 1.61 C	3.71 ± 0.14 B	213.01 ± 1.40 C	189.98 ± 1.33 C

注：同列数据不同大写字母表示同一土层及总均值不同土地利用方式间差异显著( $P<0.05$ )；不同小写字母表示同一土地利用方式不同土层间差异显著( $P<0.05$ )，下同。

非毛管孔隙度总均值变化范围是 3.71%~4.47%，其中 WG 显著大于其余 3 种土地利用方式( $P<0.05$ )；AF、CL、SS 3 种土地利用方式差异不明显( $P>0.05$ )，具体表现为  $WG>AF>CL>SS$ 。0~10、20~30 cm 土层非毛管孔隙度 WG 最大(4.36%、4.70%)，但 4 种土地利用方式间差异不显著( $P>0.05$ )；10~20 cm 土层 WG (4.36%) 与其余 3 种土地利用方式差异显著( $P<0.05$ )，但 AF、CL、SS 差异不显著( $P>0.05$ )。在土壤剖面上，除 SS 外，其余 3 种土地利用方式总孔隙度、毛管孔隙度均随土壤层次增加而减小，非毛管孔隙度变化不明显。

**2.1.2 不同土地利用方式土壤持水性能分析** 选择饱和含水量、毛管含水量两个指标，分析不同土地利用方式下土壤的持水性能，结果显示(表 2)，不同土地利用方式饱和含水量、毛管含水量总均值变化范围分别是 213.01~352.07、189.98~323.55 g/kg。其中，两个指标 SS 均显著小于其余 3 种土地利用方式( $P<0.05$ )，AF、WG 差异不显著( $P>0.05$ )。饱和含水量、毛管含水量具体大小表现为  $AF>WG>CL>SS$ 。这同时也说明了，良好的植被郁闭度能够使土壤变得疏松，从而增强土壤持水性能。其中，AF 具有良好的郁闭度及盖度，植被根系的贯穿生长以及较丰富枯落物层对土壤性状的改良作用较强，使土壤疏松多孔，容重最小，孔隙度最大，同时增强土壤的持水性能<sup>[22]</sup>。与 AF 相比，SS 植被单一，对土壤改良作用较弱。同时，土壤含有大量砾石岩片，而砾石密度较土壤大，且砾石自身孔隙与持水性能忽略不计，故导致土壤容重最大，孔隙度最低，持水性最弱。0~10、

10~20 cm 土层饱和含水量、毛管含水量均以 SS 显著小于其余 3 种土地利用方式( $P<0.05$ )，而 AF、WG、CL 差异不显著( $P<0.05$ )；20~30 cm 土层 4 种土地利用方式饱和含水量、毛管含水量差异均不显著( $P>0.05$ )。在垂直角度，除 SS 外，饱和含水量、毛管含水量均随土层增加而减小。仅 WG 20~30 cm 土层显著小于前两层( $P<0.05$ )。

**2.1.3 不同土地利用方式土壤有机质含量分析** 由图 2 可知，不同土地利用方式下土壤有机质含量总均值存在显著差异( $P<0.05$ )，以 AF 最高(53.64 g/kg)，显著高于其余 3 种土地利用方式( $P<0.05$ )；其余 3 种土地利用方式下依次为 CL 37.69 g/kg、SS 26.05 g/kg、WG 22.54 g/kg，且 SS 与 WG 差异不显著( $P>0.05$ )，但 SS 较 WG 植被盖度高，受放牧等人为影响程度弱，有机质得到累积，从而使有机质略高于 WG。CL 受到人为影响强烈，虽然作物根系对土壤结构具有一定改良，但不合理的耕作方式及化肥施用量逐年增加，导致农田土壤容重、孔隙度及持水性能仍未达到 WG 水平，这与邹文秀等<sup>[23]</sup>的研究结果一致，但受一定量作物秸秆、遗留根系及有机肥等作用，有机质水平仅低于 AF。在土壤层次上，0~10、20~30 cm 土层均以 AF 显著大于其余 3 种土地利用方式( $P<0.05$ )，CL 次之；10~20 cm 土层以 CL 最大，AF 次之，且 CL、AF 间差异不显著( $P>0.05$ )。同一土地利用方式不同土层间 AF 3 个土层差异显著( $P<0.05$ )，AF、WG 均以 20~30 cm 土层显著高于其余两个土层( $P<0.05$ )，而 CL、SS 均以 10~20 cm 土层显著高于其余两个土层( $P<0.05$ )。

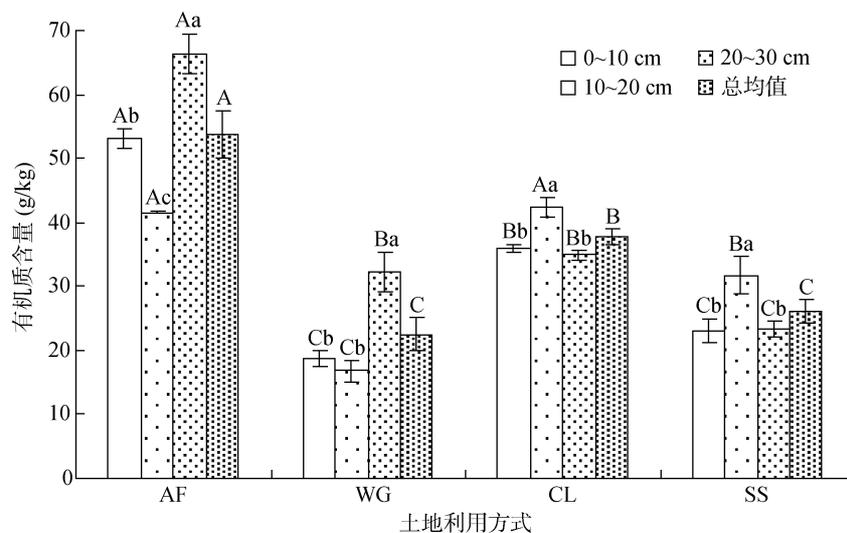


图 2 不同土地利用方式土壤有机质含量  
Fig. 2 SOM contents under different land use types

2.2 不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征

土壤颗粒组成是构成土壤结构的物质基础,也是土壤重要的物理特性之一,对土壤肥力状况、水分特征等物理性质有着明显影响,在反映土地利用方式变化对土壤侵蚀的影响方面有重要的意义<sup>[3, 24]</sup>。由表 3 可知,不同土地利用方式同一土壤颗粒粒级间差异较显著,4 种土地利用方式主要以粉粒、砂粒为主。可见,研究区土壤整体偏砂性,这符合西藏年轻地质历史、土壤风化程度低的特点。其中,3 个土层土壤中黏粒含量仅占到 0.36% ~ 4.27%; AF、WG、CL 细砂粒含量为最大占到 37.47% ~ 50.38%,粉(砂)粒其次占 14.25% ~ 30.90%; SS 粗砂粒含量为最大占到 35.53% ~ 54.54%,细砂粒其次占 23.65% ~ 34.71%,而 AF、WG、CL 粗砂粒含量范围仅在 1.65% ~ 16.26%。相较于 AF, WG、CL 0 ~ 30 cm 土层砂粒含量相应减少了 3.25%、9.37%,黏粒含量相应增加了 5.54%、50.59%; 而 SS 砂粒含量相应增加了 14.71%,黏粒含量相应减少 49.01%。CL 受到反复耕作,土壤结构破坏,小粒径颗粒很难形成大颗粒,此外,由于耕作管理方式和土壤侵蚀的作用,作物秸秆难以还田,减少了农田有机物质的投入,对土壤颗粒粘合作用减弱,从而 CL 黏粒含量增多<sup>[7, 25]</sup>,且随土层增加耕作影响程度越弱,黏粒含量也相应减小,显然,外力作用会干扰不同土壤层次之间土壤颗粒含量差异<sup>[26]</sup>。WG 的草本根系,虽然固结了一定小颗粒,但

其盖度较小,存在一定水土流失,使得黏粒含量减小<sup>[22]</sup>。ANOVA 分析表明,SS 粗砂粒显著大于其余 3 种土地利用方式( $P < 0.05$ ),而其余粒径级均显著小于其余 3 种土地利用方式( $P < 0.05$ )。综合比较粗砂粒含量为:  $SS > AF > CL > WG$ ; 细砂粒含量表现为:  $AF > WG > CL > SS$ ; 极细砂粒含量为:  $WG > CL > AF > SS$ ; 粉(砂)粒含量表现为:  $CL > WG > AF > SS$ ; 黏粒含量为:  $CL > WG > AF > SS$ 。在土壤剖面上, WG 砂粒含量随土层增加有明显的增加趋势,粉粒、黏粒含量有明显的减小趋势,这是因为年轻的地质历史,土壤风化程度低,土壤层次越深,砾石含量越多,而草本植物均为浅根系,从而使深层次土壤砂粒含量增多。SS 由于受到植被改良作用弱,土壤风化程度低,砾石含量丰富,加之,植被单一,地表覆盖物小,粉黏粒极易被冲刷,从而使土壤 SS 砂粒含量最大,黏粒含量最小。在其剖面上,以 10 ~ 20 cm 土层砂粒含量最大达 89.86%,其次为 0 ~ 10 cm 土层, 20 ~ 30 cm 土层最小。这主要是因为灌丛地植被主要以砂生槐为主,其粗根系主要分布在 0 ~ 20 cm 土层,细根、小根主要分布在 20 ~ 60 cm 土层<sup>[27]</sup>,而根系的动态主要是细根的动态,根系的吸收功能主要由细根系承担<sup>[28]</sup>。因此,在 0 ~ 20 cm 土层由于粗根系生理活动较弱,对土壤结构的改良及生物风化作用弱,导致砂粒含量增多;而具有较强生理活动的细根系,对砾石岩片产生强大的机械破坏,促进了土壤风化,增加土壤粉黏粒含量。

表 3 不同土地利用方式土壤颗粒体积百分含量(%)及分形维数  
Table 3 Soil particle volume fractions and fractal dimensions under different land use types

土地类型	土层(cm)	粗砂粒	细砂粒	极细砂粒	粉(砂)粒	黏粒	D
		2 ~ 0.25 mm	0.25 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 0.01 mm	0.01 ~ 0.002 mm	<0.002 mm	
AF	0 ~ 10	6.85 ± 0.04 Bb	47.32 ± 0.09 Ab	18.78 ± 0.06 Bb	24.86 ± 0.04 Cb	2.18 ± 0.24 Cb	2.3920 ± 0.01 Db
	10 ~ 20	1.73 ± 0.01 Cc	37.96 ± 0.11 Bc	20.89 ± 0.06 Ba	35.15 ± 0.10 Aa	4.27 ± 0.02 Aa	2.4883 ± 0.01 Aa
	20 ~ 30	16.26 ± 0.04 Ba	50.38 ± 0.22 Aa	15.94 ± 0.11 Bc	16.28 ± 0.08 Cc	1.13 ± 0.04 Dc	2.2965 ± 0.02 Dc
	总均值	8.28 ± 2.13 B	45.22 ± 1.87 A	18.54 ± 0.72 B	25.43 ± 2.73 A	2.53 ± 0.46 B	2.3923 ± 0.03 B
WG	0 ~ 10	1.65 ± 0.02 Cc	39.96 ± 0.08 Bc	23.91 ± 0.06 Aa	31.38 ± 0.06 Aa	3.10 ± 0.06 Ba	2.4369 ± 0.02 Ba
	10 ~ 20	2.15 ± 0.06 Cb	44.83 ± 0.31 Ab	23.41 ± 0.10 Ab	26.96 ± 0.26 Cb	2.66 ± 0.05 Cb	2.4180 ± 0.05 Bb
	20 ~ 30	2.56 ± 0.02 Ca	47.76 ± 0.14 Ba	22.88 ± 0.62 Ac	24.57 ± 0.09 Bc	2.23 ± 0.10 Bc	2.3929 ± 0.03 Bc
	总均值	2.12 ± 0.13 C	44.18 ± 1.14 A	23.40 ± 0.15 A	27.64 ± 1.00 A	2.67 ± 0.13 B	2.4159 ± 0.09 B
CL	0 ~ 10	7.83 ± 0.02 Ba	40.58 ± 0.29 Bb	18.22 ± 0.10 Cb	29.15 ± 0.21 c	4.23 ± 0.19 Aa	2.4985 ± 0.12 Aa
	10 ~ 20	7.49 ± 0.04 Bb	37.47 ± 0.18 Bc	17.30 ± 0.06 Cc	33.67 ± 0.14 Ba	4.07 ± 0.28 Bb	2.4857 ± 0.01 Ab
	20 ~ 30	1.94 ± 0.02 Cc	42.34 ± 0.17 Ca	22.71 ± 0.06 Aa	29.88 ± 0.15 Ab	3.13 ± 0.17 Ac	2.4416 ± 0.06 Ac
	总均值	5.75 ± 0.95 BC	40.13 ± 0.72 A	19.41 ± 0.84 B	30.90 ± 0.71 A	3.81 ± 0.17 A	2.4752 ± 0.18 A
SS	0 ~ 10	49.53 ± 1.24 Aa	23.65 ± 0.29 Cc	8.71 ± 0.24 Db	16.25 ± 0.65 Da	1.86 ± 0.07 Da	2.4049 ± 0.03 Ca
	10 ~ 20	51.54 ± 0.61 Aa	30.05 ± 0.25 Cb	8.27 ± 0.10 Db	9.76 ± 0.27 Db	0.36 ± 0.04 Dc	2.1442 ± 0.16 Cb
	20 ~ 30	35.53 ± 0.38 Ab	34.71 ± 0.31 Da	11.36 ± 0.09 Ca	16.73 ± 0.35 Ca	1.66 ± 0.41 Cb	2.3768 ± 0.03 Ca
	总均值	45.54 ± 2.55 A	29.47 ± 1.61 B	9.45 ± 0.49 C	14.25 ± 1.15 B	1.29 ± 0.24 C	2.3086 ± 0.13 C

土壤颗粒分形维数可作为土壤性质的一个有效指示因子<sup>[4]</sup>,常被用来反映土壤质地、均一程度、物理性状及肥力特征<sup>[3]</sup>。由式(1)进行回归分析得到土壤颗粒分形维数  $D$ (表 3),  $D$  值总均值分布范围在 2.308 6 ~ 2.475 2。ANOVA 分析表明,CL 显著大于其余 3 种土地利用方式( $P<0.05$ ),SS 为最小,AF 与 WG 差异不显著( $P>0.05$ )。具体表现为  $CL>WG>AF>SS$ 。这表明,人为影响程度是降低土壤结构稳定性最主要的原因之一,而良好的植被盖度,以及密集的植被根系能够固结土壤细颗粒,增强土壤结构稳定性,减小土壤分形维数。SS 由于其较低的土壤风化程度,增加了土壤抗蚀性能,从而降低分形维数。不同土地利用方式相同土层间差异均显著( $P<0.05$ ),0 ~ 10、20 ~ 30 cm 土层均以 CL 最大,而 10 ~ 20 cm 土层以 AF 略大于 CL。在同一土地利用方式不同土壤层次间差异显著( $P<0.05$ ),WG、CL 分形维数随土层增加显著减小,究其原因,研究区土壤风化程度低,砾石含量高,对于 CL,据藏民族的耕作方式,往往耕作时,浅层次土壤(0 ~ 10、10 ~ 20 cm)较大粒径级砾石易被剔除,使土壤颗粒粉黏比增加,从而分形维数增大。WG 随土壤层次加深,砾石不断丰富,砂粒含量增多,分形维数随之减小,浅层次(0 ~ 10 cm)土壤受植被及物理风化作用较强,粉黏粒含量有所增加。而 AF 及 SS 可能受到植被根系分布影响,分形维数在土壤剖面上变化规律不明显。但总体上,在土

壤剖面分形维数随土层的增加呈减小趋势。这与石宗琳等<sup>[29]</sup>的研究结果较为一致。因此,如果浅层土壤(0 ~ 10 cm)缺少植被覆盖,极易产生水土流失。

### 2.3 土壤颗粒与分形维数的关系

分形维数的高低表征土壤结构的紧实程度,越高,越紧实,反之,则松散<sup>[4]</sup>。为揭示分形维数与土壤颗粒之间的关系,分别对分形维数与砂粒、粉粒、黏粒体积百分含量进行 Pearson 相关性分析,可知分形维数  $D$  值与砂粒体积百分含量呈极显著负相关( $r = -0.873, P<0.01$ );与粉粒体积百分含量呈极显著正相关( $r = 0.860, P<0.01$ );与黏粒体积百分含量呈极显著正相关( $r = 0.913, P<0.01$ )。可见,分形维数与不同粒径颗粒具有较强的线性关系。因此,为进一步对分形维数与土壤颗粒间关系进行直观表现,分别对分形维数与砂粒、粉粒、黏粒体积百分含量再进行线性回归分析(图 3),可知,其与相关性分析表现出相同的规律,即,黏粒含量越高,分形维数越大,质地越细;砂粒含量越高,分形维数越低,质地越粗。这与张秦岭等<sup>[4]</sup>、王贤等<sup>[30]</sup>、丁敏等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。但由图 3 可知,图中均有 3 个样点出现了不同的表现特征,这主要受到 SS 影响,由于 SS 植被主要为砂生槐,受到其根系分布特征影响,导致 10 ~ 20 cm 土层砂粒含量显著增加,黏粒及粉粒含量显著减小,因此该层次分形维数值最小,这也正符合上述结论。

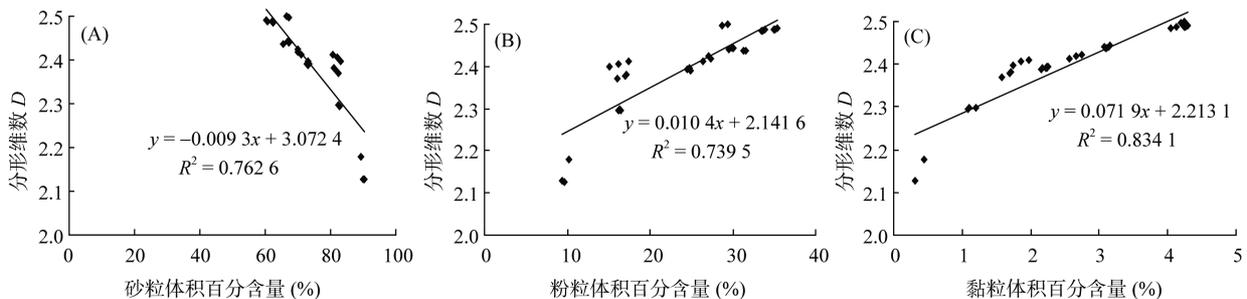


图 3 土壤体积分形维数与各粒级体积含量关系  
Fig. 3 Correlations between soil volume fractal dimensions and grain size fractions

### 2.4 土壤颗粒质量分形维数与土壤物理性质关系

颗粒分形维数很好地反映了土壤颗粒物质的变化状况,而土壤的基本物理性质受到了土壤颗粒结构组成的直接影响<sup>[32]</sup>。因此,利用单一参数分形维数代替颗粒组成表征土壤的一些基本性质使得描述变得简单<sup>[30]</sup>。从双变量 Pearson 相关性分析中看出(表 4),分形维数  $D$  值与各土壤单一物理性质具有不同程度相关性,其中与总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和含水量、毛管含水量均为正相关关系,而与容重、有机质呈负相关关系。双尾检验系数分别为

(0.192、0.206、0.351、0.135、0.144、0.061、0.734),均未达到显著程度。为进一步探明土壤颗粒分形维数影响因素,对各基本理化指标进行多元回归分析得到方程为:

$$D = 6.421 - 2.155X_1 + 0.471X_2 - 4.952X_3 + 0.824X_4 - 0.016X_5 \quad (R^2 = 0.586, P = 0.306)$$

式中: $X_1$  为土壤容重( $g/cm^3$ ); $X_2$  为饱和含水量( $g/kg$ ); $X_3$  为毛管含水量( $g/kg$ ); $X_4$  为总孔隙度(%); $X_5$  为有机质含量( $g/kg$ )。

对土壤颗粒分形维数与基本理化性质进行相关

分析,4 种土地利用方式土壤颗粒体积分形维数与有机质含量、土壤容重呈负相关,这与程先富等<sup>[33]</sup>、周先容等<sup>[5]</sup>、李进峰等<sup>[34]</sup>、文海燕等<sup>[35]</sup>的研究结果类似。但也有学者得出相反的结论<sup>[20,36-37]</sup>。而杨婷等<sup>[3]</sup>发现,土壤颗粒分形维数与有机质呈显著负相关,与土壤容重呈显著正相关。这种原因可能在于土壤颗粒分形维数对土壤养分指示作用可能具有空间选择性,或者土壤表层的有机质和养分含量虽有提高,但土壤的颗粒组成性状并没有发生明显的变化<sup>[38]</sup>。因此,在不同的取样环境,土壤受到外界环境影响各有差异,土壤颗粒分形维数受到土壤理化指标的影响程度各有不同。相关性分析表明,土壤颗粒体积分形维数与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持

水量均呈正相关。土壤对外物表面的粘附性是土壤的动力学性质之一,分形维数越高,土壤黏粒含量越丰富<sup>[30]</sup>。一方面,黏粒含量高的土壤有利于形成土壤团聚体,形成良好的结构,增加土壤毛管孔隙;另一方面单位土粒表面积越大,土壤对水分子的吸附力(粘滞力)越大,在土壤孔隙比相同的情况下,毛细管尺寸越小,与接触面水膜引起的毛细管压力的作用降低了水的势能,使其保持在土壤孔隙中不易排出,则土壤的持水性增强<sup>[30]</sup>。因此,在土壤颗粒分形维数高的土地类型,尽量减少人为破坏,恢复植被,增加植被郁闭度、盖度,减小地表径流冲刷,并适当人为投入有机质,增加黏粒颗粒胶结能力,增强土壤持水性,从而形成良好、稳定的土壤结构。

表 4 分形维数与土壤物理性质相关性分析  
Table 4 Correlation coefficients between fractal dimension and soil physical properties

分形维数	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	饱和含水量	毛管含水量	有机质	
分形维数	1							
容重	-0.387	1						
总孔隙度	0.276	-0.921**	1					
毛管孔隙度	0.268	-0.923**	0.997**	1				
非毛管孔隙度	0.199	-0.325	0.412*	0.339	1			
饱和含水量	0.314	-0.974**	0.978**	0.976**	0.390	1		
毛管含水量	0.307	-0.974**	0.978**	0.980**	0.342	0.999**	1	
有机质	-0.073	-0.321	0.260	0.296	-0.321	0.294	0.307	1

注: \*表示相关性达到  $P<0.05$  显著水平, \*\*表示相关性达到  $P<0.01$  显著水平。

### 3 结论

1) 4 种土地利用方式 0~30 cm 土层对土壤理化性质影响差异显著。容重表现为  $SS>CL>WG>AF$ , 不同土层间土壤容重随着土层增加呈增大趋势;总孔隙度、毛管孔隙度、饱和持水率、毛管持水率均与容重规律相反;土壤有机质表现为  $AF>CL>SS>WG$ 。

2) 4 种土地利用方式主要以粉粒、砂粒为主,黏粒含量仅占到 0.36%~4.27%, 研究区土壤质地偏砂性。受土壤颗粒分布的影响,4 种土地利用方式土壤颗粒体积分形维数表现出较强的空间差异性,其分形维数总均值为 2.308 6~2.475 2。受人为影响强烈的 CL 土壤结构破碎,分形维数最大, WG 次之。土壤风化程度低的 SS, 土壤呈粗粒化,分形维数最小,应尽量避免人为植被破坏,减少放牧,增加有机质外源物质。

3) 分形维数反映土壤质地的均匀性,其与黏粒和粉粒含量呈极显著正相关;与砂粒呈极显著负相关,即,土壤黏粉粒含量越高,分形维数越大,砂粒

含量高,分形维数越小。因此,一定程度上,可通过土壤颗粒分形维数评估区域水土流失程度。

4) 土壤颗粒体积分形维数与各土壤单一物理性质具有不同程度相关性,其中与总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和含水量、毛管含水量均为正相关关系,而与容重、有机质呈一定负相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 李广, 黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 85-90
- [2] 白一茹, 王幼奇, 展秀丽. 陕北农牧交错带土地利用方式对土壤物理性质及分布特征的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1619-1627
- [3] 杨婷, 景航, 姚旭, 等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 1-5
- [4] 张秦岭, 李占斌, 徐国策, 等. 丹江鹳鹑沟小流域不同土地利用类型的粒径特征及土壤颗粒分形维数[J]. 水土保持学报, 2013(2): 244-249
- [5] 周先容, 陈劲松. 川西亚高山针叶林土壤颗粒的分形特征[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8): 891-894

- [6] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38(20): 1896-1899
- [7] 张超, 刘国彬, 薛蕙, 等. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学, 2011, 44(3): 507-515
- [8] Arya L M, Paris J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Soc. Am. J, 1981, 45: 1023-1031
- [9] Turcotte D L. Fractals and fragmentation[J]. J.Geophys. Res, 1986, 91(B2): 1921-1926
- [10] 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 545-550
- [11] 刘继龙, 马孝义, 汪可欣, 等. 土壤特性的时空变异性及其应用研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012
- [12] 李海东, 沈渭寿, 蔡博峰, 等. 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与风沙化土地演变的耦合关系[J]. 生态学报, 2013, 24: 7729-7738
- [13] 李海东, 沈渭寿, 赵卫, 等. 西藏高寒河谷沙地生态恢复与安全屏障建设的对策建议[J]. 环境科学与技术, 2013(12): 160-163, 174
- [14] 袁磊, 沈渭寿, 李海东, 等. 雅鲁藏布江中游河谷区域风沙化土地演变趋势及驱动因素[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 301-305
- [15] 毛绍娟, 李红琴, 张锦铨, 等. 日喀则河谷退耕还草(林)工程实施后生态功能效应的初步分析[J]. 草地学报, 2015, 23(6): 1278-1286
- [16] 蔡晓布, 钱成, 张元, 等. 西藏中部地区退化土壤秸秆还田的微生物变化特征及其影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 463-468
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 34-88
- [18] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, (15): 5183-5190
- [19] 李民义, 张建军, 王春香, 等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 125-130
- [20] 邓羽松, 丁树文, 蔡崇法, 等. 鄂东南崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(24): 4850-4857
- [21] 李柳莹, 王延平, 韩明玉, 等. 洛川苹果园土壤的理化特征分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2016, 44(4): 185-194
- [22] 任婷婷, 王瑄, 孙雪彤, 等. 不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 123-126
- [23] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193
- [24] 常美蓉, 庞奖励, 张彩云, 等. 关中东部不同土地利用方式对土壤质地影响探讨[J]. 土壤与作物, 2009, 25(1): 50-53
- [25] 孙彩丽, 薛蕙, 刘国彬, 等. 黄土区不同施肥对土壤颗粒及微团聚体组成的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 550-561
- [26] 王冬冬, 高磊, 陈效民, 等. 红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究[J]. 土壤, 2016, 48(2): 361-367
- [27] 韩艳英, 叶彦辉, 王贞红, 等. 西藏砂生槐根系生物量、比根长和根长密度[J]. 东北林业大学学报, 2014(2): 39-41
- [28] Caldwell M M, Pearcy R W. Exploitation of environmental heterogeneity by plants: Ecophysiological processes above and belowground[M]. San Diego: Academic Press, 1994
- [29] 石宗琳, 王加旭, 梁化学, 等. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 387-399
- [30] 王贤, 张洪江, 程金花, 等. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 154-159
- [31] 丁敏, 庞奖励, 刘云霞, 等. 黄土高原不同土地利用方式下土壤颗粒体积分形特征[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 161-165
- [32] 陈小红, 段争虎, 何洪泽. 荒漠-绿洲边缘区生态过渡带的土壤颗粒分形特征[J]. 土壤, 2009, 41(1): 97-101
- [33] 程先富, 史学正, 王洪杰. 红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征[J]. 地理科学, 2003, 12(5): 617-621
- [34] 李进峰, 宫渊波, 陈林武, 等. 广元市不同土地利用类型土壤的分形特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 167-170
- [35] 文海燕, 傅华, 赵哈林. 退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分型特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 55-59
- [36] 张世熔, 邓良基, 周倩, 等. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系[J]. 土壤学报, 2002, 39(2): 221-226
- [37] 苏永中, 赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 71-74
- [38] 陶俊, 何丙辉, 李天阳, 等. 三峡库区 4 种不同草本植物根际土壤的颗粒分形特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 35-40

## Effects of Land Use Types on Soil Physicochemical Properties and Fractal Characteristics of Soil Particles in Middle Reaches of Yajiang River

LIANG Bo<sup>1,2</sup>, LIN Tianmiao<sup>3</sup>, REN Dezhi<sup>4</sup>, NIE Xiaogang<sup>1,2</sup>, WAN Dan<sup>1,2\*</sup>, YU Wu<sup>1,2</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>

(1 *College of Resource and Environment, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China*; 2 *Research Center of Soil and Water Conservation in Alpine-cold Region, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China*; 3 *Plant Development and Management Center for Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China*; 4 *Chengdu Academy of Agriculture and Forestry Science, Wenjiang, Sichuan 610000, China*)

**Abstract:** The effects of four land use types on soil physicochemical properties in the middle reaches of Yajiang River were studied by field investigation and laboratory measurement and volume fractal characteristics soil particles and their relation with soil particle size distribution and soil properties were studied and discussed. The results showed that physicochemical properties of 0–30 cm soil varied greatly under different land use types ( $P < 0.05$ ), soil bulk densities under different land use types increased with the increase of soil depth and showed an order of sparse shrub > farmland > wild grass ground > artificial forest land, while total porosity, capillary porosity, saturated moisture capacity and capillary water content showed inverse trends. Silts and sands were predominant in soils under four land use types, the percentages of clays only ranged from 0.36% and 4.27%, and soil textures were dominated by sand. In 0–30 cm soil, average volume fractal dimensions were in an order of farmland > wild grass ground > artificial forest land > sparse shrub. The artificial forest had best soil structure, which were relatively loose with good permeability, while fractal dimension of the sparse shrub was the smallest are affected by the gravel and with the weakest water and fertilizer retention capacities. The volume fractal dimension of soil particles had an extremely significant negative correlation with the volume percentage of sands ( $r = -0.873$ ,  $P < 0.01$ ) while an extremely significant positive correlation with the volume percentage of silts and clays ( $r = 0.860$ ,  $P < 0.01$ ;  $r = 0.913$ ,  $P < 0.01$ ), which indicated that, to some extent, the fractal dimension of soil particles can be used as an index to assess soil erosion in the studied area. The volume fractal dimension of soil particles was positively correlated with total porosity, capillary porosity, saturated water content and capillary moisture content, but negatively correlated with bulk density and organic matter.

**Key words:** Land use types; Soil physicochemical properties; Volume fractal dimension; Soil particles