土地覆盖变化对高山草甸土壤特性的影响

王根绪[①②] 程国栋[①] 沈永平[①] 钱 鞠[②]

(①中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; ②兰州大学资源环境学院, 兰州 730000.
E-mail: gxwang@ns.lzb.ac.cn)

摘要 以青藏高原东南部高寒草甸草地为例, 从土壤养分、土壤物理性质以及土壤水分含量, 研究了高山草甸土壤特性在不同土地覆盖下的变化特征. 随地表植被退化、植被覆盖度降低, 土壤密实度下降, 原有的致密根系层逐渐风化剥离, 地下生物量显著减小, 水土流失加剧, 砾石含量增加, 土壤显著粗砺化. 上层土壤(0 ~ 20 cm)有机质含量与全氮含量随植被覆盖度变化具有显著的相关关系, 表明当高寒草甸植被盖度大于 60%时, 随植被覆盖度增加, 土壤有机质与全氮含量急剧增加. 覆盖度小于 30%时, 植被盖度减少, 土壤养分要素含量也随之明显递减, 但在覆盖度 30% ~ 60%之间变化时, 土壤养分含量呈相对稳定状态; 从统计角度提出了描述这种相互关系的数学方程. 上层土壤含水量随植被覆盖度而增加, 土壤含水量随植被覆盖变化规律呈现显著的二次抛物线性过程. 深层土壤的养分与水分变化较复杂, 与植被覆盖度之间没有明显依存关系. 初步估算表明: 植被覆盖度从 90%下降到 30%以下时, 高山草甸土壤有机质将流失 14890 kg/hm^2, 氮素损失将达到 5505 kg/hm^2.

关键词 土地覆盖变化 高山草甸土 土壤特性 影响

土地利用与土地覆盖变化是全球环境变化的重要组成部分和主要原因[1,2]. 人类活动对土壤环境的影响是研究全球环境变化与可持续发展问题的核心内容[3,4], 人为作用引起的土壤环境变化是衡量和反映区域土壤资源与环境质量的重要标志[4]. 大量研究表明不同土地利用方式和管理措施影响着土壤环境变化的方向与幅度[5,6]. 土地覆盖是自然和人工覆盖地表诸要素的综合体, 主要包括土地和植被类型以及植被密度、植被生长季节的动态特征和地表覆盖的生物物理特征等, 与土地利用有所不同, 它强调土地的自然属性[1,7]. 土地利用造成土地覆盖变化, 土地覆盖变化直接影响陆地生态系统以及生物地球化学循环, 并通过改变土壤特性, 导致土壤损失和土壤退化[6,7].

土壤特性是一系列土壤物理化学特征的综合反映, 体现了土壤环境的基本状况, 包括土壤物理结构与组成、土壤化学与养分特征以及土壤水分行为特征等. 相对草地土壤而言, 有关森林土壤与农田土壤环境在不同土地利用与管理措施下的变化研究开展较早, 在不同气候与地貌条件下, 对土地覆盖/利用变化下土壤的理化性质与环境特性的改变都有较为深入的研究[6]. 已有的初步研究表明[8~10], 草地覆盖变化与森林覆盖变化相似, 对土壤水文循环以及土壤养分迁移变化具有显著影响. 在草地土壤中, 广泛分布于青藏高原和内陆山地的高山草甸草地土壤具有特殊性. 以青藏高原为例, 由于高寒草甸与高寒草原土壤的水热变化的显著性、植被系统对气候变化的高度敏感性以及土地利用对草地土壤覆盖影响的相对微弱性[11,12], 使其在全球变化研究以及高寒植被类型的土壤-植被-大气相互作用关系研究方面具有极其重要的作用. 近年来青藏高原土地覆盖变化对全球碳循环的影响、全球变化对高原陆地生态系统的影响及其反馈机制问题, 逐渐成为备受关注的热点课题. 同时, 由于高山草甸草地的分布区与众多河流的河源区相对应, 一方面江河源区以植被退化和土地荒漠化为代表的生态环境变化已引起全社会广泛关注, 土壤环境维护是该区域生态环境保护与建设的关键[12,13]; 另一方面土壤水分行为的变化与流域水文过程密切关联, 因此, 开展高山草甸土壤特性在土地覆盖/土地利用变化中响应特征的研究, 就显得十分必要.

1 研究区域概况及高山草甸土壤的分布特征

选择高山草甸土壤分布相对集中、且高寒草甸植被退化较为严重的青海达日县作为研究区域[11,14]. 该区域位于青藏高原东南部, 青海省果洛藏族自治州南部, 属于高寒半湿润气候区, 年平均气温–0.1 ~ 3.5℃, 年均降水量 569 mm, 区域经济活动以草地畜牧业为主, 基本无其他土地利用方式, 这里是青藏高

原乃至世界上高山草甸土壤连续分布的主要地区之一[12]. 在区域植被生态景观分布上具有从高寒灌丛草甸向高寒草原类型演变的特征, 在选择的研究区域以高寒草甸景观为主, 占据海拔 4300 ~ 4600 m 以下山地阳坡、半阴坡以及宽谷阶地和滩地, 在局部阴坡地带分布着高寒灌丛草甸景观类型, 呈现与高寒草甸景观的复合分布特征; 在海拔 4600 ~ 5000 m 以上为垫状植被和流石坡稀疏植被分布的寒漠带. 对应植被生态景观类型分布地带性土壤有高山寒漠土、高山草甸土、高山草原土、以及非地带性土壤草甸土和沼泽土等 5 类, 其中在高寒草甸植被下发育的高山草甸土为主要土壤类型, 占总土地面积的 82.59%, 广泛分布于海拔 4550 m 以下的大部分地区. 在研究区域根据植被覆盖类型与土壤形成条件可进一步划分为原始高山草甸土、高山草甸土、侵蚀高山草甸土和高山灌丛草甸土 4 种, 研究区域高山草甸土壤分布及剖面特性见图 1, 其中原始高山草甸土分布面积较小, 不作为本次研究对象, 其余土壤的基本特征描述如下[11, 12]:

高山草甸土. 土壤土层较薄, 厚度一般为 30 ~ 60 cm, 母质以坡积物、残积物为主, 土壤粗骨性强, 粒径以 0.01 ~ 1 cm 为主, 一般占 70%左右; 以嵩草属(*Kobresia*)为优势建群, 盖度 75% ~ 95%; 0 ~ 10 cm 范围是根系交织密集的草皮层, 富含有机质, 一般为砂质壤土, 受致密毡状根系影响, 土体湿润; 在 10 ~ 25 cm (30 cm)范围, 一般属于根系分布较多的腐殖质层, 土质较疏松, 含有少量半风化砾石; 在(25 cm) 30 cm 以下, 根系含量减少, 砾石成分增加.

侵蚀高山草甸土. 一般分布在向阳缓坡或滩地, 属于因鼠害以及人类活动影响的严重退化高山草甸土, 俗称“黑土滩”, 以杂类草和嵩草为建群种, 盖度在 50%以下; 0 ~ 10 cm (6 cm)根系较多, 土质疏松, 含砾石, 一般属于石质中壤土; 10 (6) ~ 20 cm 根系很少, 多孔, 多砾石.

高山灌丛草甸土. 多分布于海拔 3800 ~ 4400 m 的山地阴坡、半阴坡, 是在原生灌丛植被和草甸植被共同作用下发育而成的土壤; 在研究区域以高寒灌丛草甸植被如高山柳(*Salix oritrepha*)、金露梅(*Dasiphora fruticosa*,)以及嵩草(*Kobresia bellardii*)、早熟禾(*poa alpina*)等为优势植被, 植被总盖度 80% ~ 95%. 在 0 ~ 20 cm, 腐殖质含量高, 根系密集但未交织成毡状, 土壤较松散; 20 ~ 40 cm, 轻壤土, 根系以灌木根为主; 40 cm 以下, 轻壤土, 受冻结影响, 土体较湿润.

2 研究方法

研究区域土地利用以单一草地畜牧业为主, 在土地覆盖的植被类型与土地类型上, 本次研究特定在高寒草甸植被和高山草甸土一种土地类型和植被覆盖类型. 达日县全境 82.59%的土地面积为高山草甸土, 其覆盖植被类型是以高山嵩草、线叶嵩草为优势种的高寒草甸植被, 可充分满足研究要求. 研究方法以样方调查、定位试验和室内实验分析相结合为主.

(ⅰ) 关于土地覆盖与土壤特性的定位. 由于植被类型与土地类型相同, 土地覆盖变化以自然和人为因素引起的植被覆盖变化为主要考虑指标, 地形(高度、坡地与滩地)对植被群落结构存在一定影响, 但在调查区没有影响植被类型, 相同植被类型的覆盖度与植被退化程度有关, 并明显受坡向影响, 阳坡低于阴坡, 数据分析时将这种影响仍然按不同植被覆盖的结果来对待. 基于描述与植被覆盖变化的关

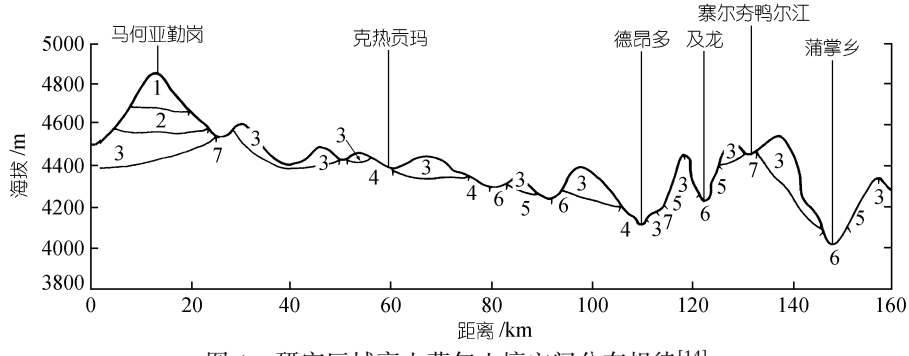


图 1 研究区域高山草甸土壤空间分布规律[14]

1. 高山石质寒漠土, 2. 原始高山草甸土, 3. 高山草甸土, 4. 侵蚀高山草甸土, 5. 高山灌丛草甸土, 6. 草甸土, 7. 沼泽土

系考虑，本次研究限定土壤物理性质(土壤组成结构、土壤密度与容重)、土壤养分要素(有机质与全氮含量)、土壤水分等作为刻画土壤特性的主要指标.

(ⅱ) 野外样方部署与调查. 为揭示高寒草甸土地覆盖变化对土壤特性的影响，以样方调查为主要手段，以达日县吉迈乡、建设乡与窝赛乡为主要样方调查区域，考虑到地形、地貌条件对土壤特性的可能影响，样方部署按流域为单元. 在垂直和平行流域方向上部署调查剖面，剖面应能在不同高度上穿越山体阴坡与阳坡，依地形和坡度变化以及植被覆盖度的变化. 在每条剖面上布置调查样方点，详细记录样点的植被类型与组成、植被覆盖度、土壤剖面特性以及土壤厚度等，进行土壤含水量、土壤入渗以及土壤水分蒸散发速率测定，采取土样，进行室内养分含量测定与土壤粒度组成分析.

(ⅲ) 土壤含水量的测定主要采用时域反射(TDR)水分仪，可直接测定不同深度土壤的体积含水率，非常适宜于研究区域质地较粗的土壤，每层土壤平行测定 3 组；同时，用烘干法测定相同土层的重量含水率. 土壤容重采用不同直径环刀法和 HY-1000 土壤容重仪测定，结果相互验证.

(ⅳ) 土壤养分主要测定常量成分. 有机质、全氮、磷、钾以及碱解氮、速效磷和速效钾等. 由于研究区域土壤深度在 40 ~ 60 cm 之间，植物根系主要集中在 10 ~ 30 cm 深度范围，灌丛草甸根系可深达 60 ~ 70 cm，因此，土壤养分分析样品采集深度分 10，20，30，40 和 60 cm 等 5 个层次，经室内分析测定后，在进行不同地表覆盖的土壤养分变化对比分析时，为便于揭示土壤上层(0 ~ 30 cm)和深层(30 ~ 60 cm)的不同特征，又将结果分别汇总于这两种深度层次.

3 研究结果

3.1 土地覆盖变化的土壤养分响应

土壤有机质和氮素是土壤主要的养分指标，同时有机质还是形成土壤结构的重要因素，直接影响土壤肥力、持水能力、土壤抗侵蚀能力和土壤温度等，是土壤特性的重要指标之一[13]. 不同植被覆盖下不同深度土壤养分含量测定结果的统计情况见表 1，2. 图 2 是高寒草甸土壤在不同植被覆盖下 0 ~ 30 cm 深度土壤有机质和全氮含量的测定结果的分布，从不同植被覆盖的土壤有机质含量的散点分布趋势来看，随植被覆盖变化，高山草甸土壤上层土壤(0 ~ 30 cm)有机质含量呈现明显的三次多项式曲线变化规律，其拟合的统计曲线方程为

$$y = -5.2112 + 3.3854c - 0.0789c^2 + 0.00055c^3, \quad (1)$$

其中 y 代表土壤有机质含量(g/kg)，c 代表植被覆盖度(%)，该统计拟合方程的统计检验 $R^2 = 0.9394$. 由于该曲线方程具有较高的统计检验值，因此可用其代表高寒草甸草地土壤有机质随盖度变化的一般性规律. 从图 2 可以看出，在保持原有的密根性高覆盖草

表 1 不同土地覆盖度下 0 ~ 30 cm 深度范围高山草甸土壤养分含量测定值统计

覆盖度/%	土壤有机质含量/g · kg^{-1}				土壤全氮含量/g · kg^{-1}			
	样点数	均值	最大值	最小值	样点数	均值	最大值	最小值
<15	4	24.9	30.94	20.3	4	1.34	2.01	1.04
15 ~ 30	8	37.99	48.44	23.5	8	2.28	3.25	1.13
30 ~ 50	9	43.27	52.1	30.1	9	2.7	3.25	2.01
50 ~ 70	11	44.08	56.7	35.81	11	2.01	3.2	2.01
70 ~ 90	16	71.91	113.87	39.32	16	3.77	5.9	2.24
>90	8	100.27	118.4	78.4	8	4.83	5.92	3.27

表 2 不同土地覆盖度下 30 ~ 60 cm 深度范围高山草甸土壤养分含量测定值统计

覆盖度/%	土壤有机质含量/g · kg^{-1}				土壤全氮含量/g · kg^{-1}			
	样点数	均值	最大值	最小值	样点数	均值	最大值	最小值
<15	4	15.34	17.71	12.5	4	1.03	1.21	0.91
15 ~ 30	7	16.51	22.65	12.5	7	1.16	1.51	0.86
30 ~ 50	8	20.47	27.1	9.59	8	1.25	1.51	0.66
50 ~ 70	11	22.58	37.9	12.9	11	1.29	1.72	0.9
70 ~ 90	15	33.18	49.6	12.99	15	1.81	3.03	0.89
>90	8	44.95	97.5	26.03	8	2.35	4.24	0.53

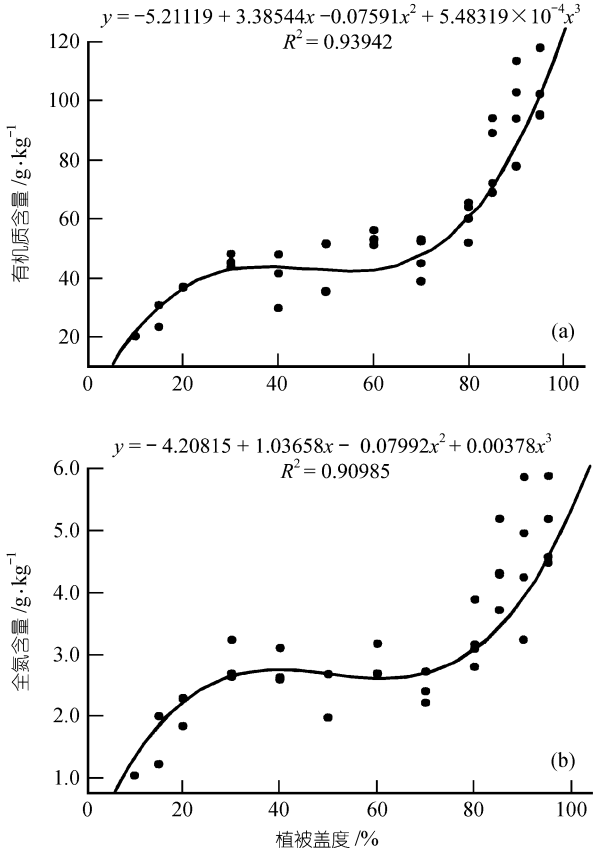


图 2 高山草甸土壤有机质与全氮含量(0 ~ 30 cm)随地表植被盖度不同的变化趋势

甸植被时(覆盖度一般大于 80%), 土壤有机质含量随植被覆盖度增高而近互直线增加, 盖度为 95%时的有机质平均含量是70%盖度土壤的 1.5 ~ 2.0 倍. 在研究区域, 原有的高寒草甸植被在未受到破坏而退化时的覆盖度较高, 土壤具有较高的有机质含量, 如表 1 和图 2 所示, 在覆盖度达到 90%以上时, 有机质含量一般在 70 g/kg 以上. 高寒草甸草地中度退化, 覆盖度由 90%以上降低到 60% ~ 70%时, 土壤上层有机质含量将锐减 30% ~ 35%.

高寒草甸植被覆盖度在 30% ~ 60%之间变化时, 上层土壤有机质含量几乎没有明显变化, 在 45 ~ 50 g/kg 间保持相对稳定. 在野外调查中发现, 地表植被覆盖度介于30% ~ 60%之间的土壤类型, 均属于高山草甸土壤退化形成的侵蚀高山草甸土, 多分布于河滩或山坡平缓地带. 以次生杂类草为主要建群植被, 原有嵩草草甸草地呈斑状分布, 且因多属于冷季草场, 过牧严重, 植被覆盖度的增加以杂毒类草的丛生发展为依托. 而这些植物多属于浅根茎当年生种, 对土壤养分要素积累无明显作用, 随着原有嵩草草甸植被退化, 土壤具有的致密根系层逐渐消失, 有机质随生草层的退化而逐渐流失. 如果土地覆盖进一步恶化, 植被覆盖度低于 30%时, 地表呈现严重侵蚀的水蚀沟槽或经鼠害掏挖形成的密布心土堆. 地表明显粗砺化, 上层土壤有机质含量再度呈现急剧减少的趋势, 植被盖度由 30%减少到 10%, 有机质含量平均递减 10 ~ 15 g/kg.

土壤氮素与有机质相似, 在土壤中的含量与分布与植被、水热条件有关, 不仅是主要的土壤肥力指标, 也是指示土壤特性的重要标志. 在高山草甸土壤上层(0 ~ 30 cm), 其含量随地表植被覆盖不同的变化与有机质含量变化具有十分相似的规律(表 1 和图 2), 统计意义上的趋势方程也呈三次多项式:

$$N = -4.208 + 1.037c - 0.0799c^2 + 0.0038c^3, \quad (2)$$

其中 N 代表全氮含量(g/kg), 统计检验 $R^2 = 0.9098$. (2)式与(1)式在形式上完全一致, 在实测数据的散点图上, 统计曲线的形态与有机质变化十分相似, 表明土壤全氮含量随植被覆盖变化也具有在植被高覆盖(>70%)与低覆盖(<30%)时变化剧烈、中覆盖(30% ~ 60%)时相对稳定的变化特征. 所不同的是, 在覆盖度大于 85%时, 实际全氮含量测定数据偏离回归曲线较有机质含量为大, 实际数据显示出更为剧烈的变化, 覆盖度从 95%降低到 85%, 全氮含量平均递减 35% ~ 40%, 其递减幅度要显著高于有机质含量.

土壤全氮含量与有机质含量具有十分密切的关系, 土壤氮的积累和消耗程度取决于土壤有机质的生物积累和分解[13]. 研究表明, 以嵩草草甸为优势群落的高山草甸土壤中 95%以上的氮素形态是有机态氮, 随嵩草草甸植被退化, 有机质含量降低, 必然引起土壤有机氮含量减少; 同时高山草甸氨化作用较强, 土壤氮素的氨挥发和反硝化损失高, 因此植被退化后氮素减少速度较快[14]. 图 2(b)中平坦段的出现, 同有机质含量变化相同, 在很大程度上归因于杂类草不具有致密根系层, 其覆盖度增加并不能增加土壤有机态氮含量.

深层土壤(30 ~ 60 cm)有机质与全氮含量随地表植被覆盖变化的分布如图 3 所示, 尽管高覆盖区(覆盖度大于 80%)的土壤有机质与全氮等养分含量也呈现高值分布(表 2), 但没有明显的相关函数关系. 比较上层土壤, 深层土壤有机质与全氮含量变化复杂,

说明深层土壤养分含量的影响因素多样. 虽然高植被覆盖度可以使得深层土壤根系含量较高, 从而使深层土壤有机质与全氮含量呈现高值分布(图 3), 但土壤温度、土壤水分以及土壤物理组成与结构等因素对土壤有机质与全氮含量的影响较大[13,14]. 高寒草甸植被根系在上层土壤集中分布的特点, 使得植被覆盖影响在土壤深层已不具有决定性作用.

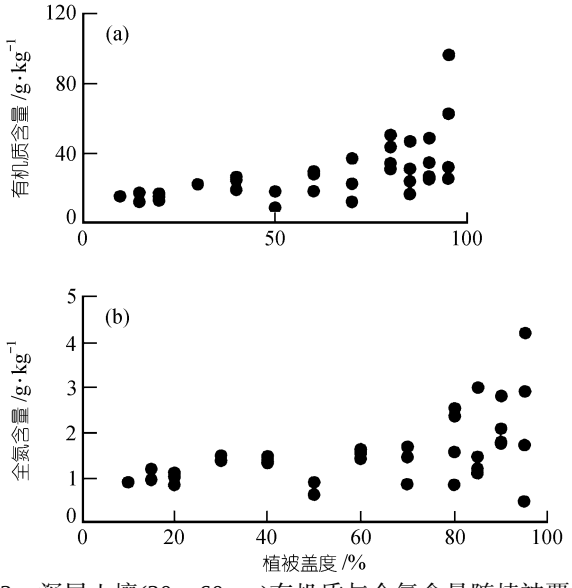


图 3 深层土壤(30 ~ 60 cm)有机质与全氮含量随植被覆盖的变化

据上述分析, 以 30 cm 为土壤厚度计算, 原状土壤盖度按平均 90%考虑, 不同植被盖度土壤上层容重不同. 依据实测的平均值为依据, 不考虑有机质与氮素损失的途径和方式, 单纯从不同盖度土壤平均有机质与全氮含量变化推算植被退化后导致的高山草甸土壤养分流失量, 可简单地用下式计算:

$$\Delta C = F \cdot h \cdot \gamma(c_1 - c_2)/1000, \qquad (3)$$

结果列于表 3.

表 3 植被覆盖变化导致的高山草甸土壤养分流失量

植被覆盖变化	未退化(盖度 90%)	轻度退化(覆盖度 70%)	中度退化(覆盖度 40%)	重度退化(覆盖度 20%)
土壤容重 /g · cm^{-3}	1.04	1.21	1.38	1.55
有机质损失 /kg · hm^{-2}	–	8370	9960	14890
氮素流失 /kg · hm^{-2}	–	1590	1716	5505

(3)式中ΔC 表示单位面积土壤有机质(全氮)含量变化量, F 为计算面积(hm^2), h 为土壤厚度(这里按 30 cm 计算), γ是土壤容重(g/cm^3); c_1, c_2分别代表不同植被覆盖度下的土壤有机质与全氮的平均含量(g/kg).

从表 3 可以看出, 高山草甸土壤养分对植被覆盖具有较强的响应, 轻度退化就可导致每公顷土壤损失有机质 8370 kg, 损失氮素 1590 kg; 若遭受严重退化时, 有机质将流失 14890 kg/hm^2, 氮素损失将达到 5505 kg/hm^2. 有机质和有机氮的损失与植被退化后致密根系层消失以及由此导致的土流失加剧有关, 同时土壤氮素损失还与自然条件下高山草甸氨挥发及反硝化作用较强使得草甸土壤氮素输出大于氮素输入的特征有关[14].

3.2 植被覆盖变化对高山草甸土壤物理性质的影响

高山草甸土壤是在特定水热条件下和高寒草甸植被覆盖下形成的地带性土壤, 在同一地区相同植被条件下, 地带性高山草甸土壤的物理性质相近. 植被覆盖度降低, 严酷的自然环境必然导致土壤水蚀、风蚀加剧, 从而改变土壤的物理性质. 表 4 列出了几种物理特性指标在不同植被覆盖度下的变化. 原生高寒草甸在 0 ~ 10 cm 范围内往往根系交织密集, 形成致密毡状的草皮层, 地下生物量的 92.15% ~ 97.9%集中在 0 ~ 20 cm 深度范围内[12,14]. 0 ~ 20 cm 深度平均草土比为 1∶16.8, 土壤密度较大, 但容重较小, 在研究区域最大土壤容重仅为 1.04 g/cm^3, 一般不含砾石成分或含量很少(表 4). 在植被退化、原生嵩草被次生杂草取代的过程中, 土壤密实度下降, 在覆盖度下降到30%以下时, 土壤表层密度一般在0.38 kg/cm^2 以下[12,15]; 由于原有的致密根系层也逐渐风化剥离, 地下生物量迅速减少, 土壤草土含量比减少到 1∶804. 由于固定土壤的植物及根系的减少, 水土流失加剧, 土壤容重增大, 砾石含量增加, 土壤显著粗砺化(表 4).

事实上, 高寒草甸植被退化后的土壤物理性质变化, 与高原鼠类的活动关系密切. 有研究表明: 草甸植被覆盖度降低将导致高原鼠类大量侵入, 高原鼠类不仅啃食植物根茎、切断植物根系, 而且把大量新土推出地面, 形成密布土丘, 这些土丘压埋植被, 并在水蚀和风蚀作用下形成斑状秃斑地, 并随地下洞穴密度加大, 土壤疏松, 土壤侵蚀作用加强[12,13]. 因此, 伴随土地覆盖变化, 高山草甸土壤物理特性将发生显著改变. 但当草地严重退化, 由于植物资源严重缺乏限制了高原鼠类的数量增长, 并驱使其向周边地区迁移. 因此中等退化程度的高寒草甸高原鼠类危害最严重, 在向重度退化过程中, 土壤物理性质

表 4 高寒草甸植被覆盖程度与土壤物理特征变化的关系

覆盖程度	土壤表层密度/g·cm^{-3}	草土比 (0 ~ 20 cm)[15]	土壤容重/g·cm^{-3} (0 ~ 20 cm)	平均鼠群分布密度[15] /只·hm^{-2}	粒径大于 2 mm 砾石含量 (0 ~ 20 cm, %)
70% ~ 80%	2.90	1∶38.1	1.17 ~ 1.22	82	3 ~ 16
40% ~ 60%	2.30	1∶61.8	1.21 ~ 1.43	148	15 ~ 24
0% ~ 30%	0.38	1∶804	1.36 ~ 1.57	48	25 ~ 57
原生草地	4.03	1∶16.8	0.68 ~ 1.04	25	0 ~ 8

变化也最为剧烈.

3.3 土地覆盖变化对土壤水分含量的影响

依据土壤剖面水分分布的测定结果(表 5), 植被覆盖度与土壤水分的关系十分密切. 图 4 反映了在 20 和 50 cm 深度上, 土壤水分含量随植被盖度变化的测定结果. 从本次所有试验点的数据分布来看, 20 cm 深度水分含量在植被盖度方向的分布具有十分明显的抛物线型趋势, 从统计角度很容易获得这种分布的相关方程:

$$y = 19.46619 - 0.08219c + 0.00667c^2, \qquad (4)$$

表 5 不同土地覆盖下高山草甸土壤水分含量测定结果的统计特征 (单位: %)

覆盖度/%	样点数	0 ~ 30 cm 深度			30 ~ 50 cm 深度		
		均 值	最大值	最小值	均 值	最大值	最小值
≤15	8	23.4	27.0	17.3	18.37	23.5	14.3
30	9	23.6	29.9	20.7	20.68	28.8	15.6
50	8	28.94	35.4	20.7	21.58	27.6	15.4
70	7	37.27	44.9	27.8	29.75	38.6	22.0
≥90	9	54.34	73.9	40.9	30.4	38.9	27.2

其中 y 表示土壤含水量(%), c 代表植被盖度(%), 其相关检验的 $R^2 = 0.9949$, 表明植被盖度与土壤含水量之间具有非常密切的上述定量关系, 也表明土壤上层含水量随植被覆盖度变化具有低覆盖变化缓慢而高覆盖变化剧烈的规律. 与此有所不同, 50 cm 深度范围内土壤水分与植被盖度的散点趋势如图 4(b)所示, 虽然其拟合的植被盖度与土壤含水量之间的相关方程也是二次多项式, 可表示如下:

$$y = 21.94 + 0.0462c + 0.000133c^2, \qquad (5)$$

其相关检验的 $R^2 = 0.9136$. 与上层土壤含水量变化相比, 方程构成不同, 其散点规律性不显著, 相对水分变化复杂. (4)和(5)式是在试验数据的基础上获得的统计关系, 由于试验的植被盖度范围介于 15% ~ 90%, 在这个范围内, 用这两式可以获得一定植被盖度的土壤 20 和 50 cm 深度位置的水分状况.

图 4 中的曲线既是试验数据散点趋势线, 又可反映对非试验盖度值对应土壤水分含量的模拟值, 如当植被盖度为 40%时, 20 和 50 cm 深度范围内土壤水

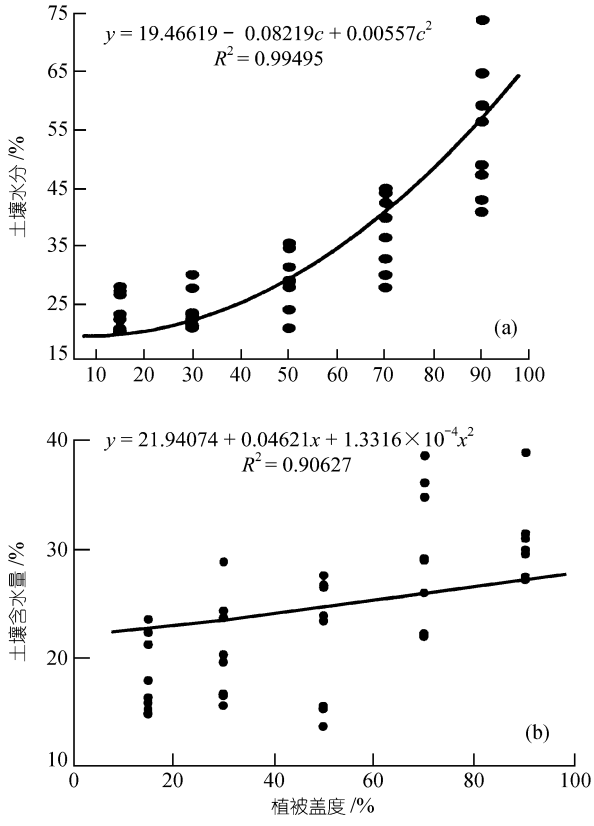


图 4 不同深度上土壤水分随植被盖度的变化

分含量应为: (26.85 ± 13.4)%和(23.85 ± 11.9)%. 上述经实测数据统计获得的定量关系表明, 对于高寒草甸植被而言, 植被盖度增加, 有利于提高高山草甸土壤含水量, 尤其是浅层土壤(20 cm)表现得十分突出. 当植被盖度大于 60%时, 植被盖度每增加 10%, 浅层土壤含水量增加幅度可达 5% ~ 15%; 植被覆盖度从 30%增加到 70%, 与上述土壤养分要素变化不同, 土壤含水量则显著增加 20% ~ 25%(图 4). 对于深层土壤(50 cm), 植被覆盖度变化与土壤含水量之间关系比较复杂, 尽管高覆盖土壤含水量也较高, 但相关趋势不明显(图 4). 分析产生这种现象的原因, 除了高覆盖原生高寒草甸植被在 0 ~ 20 cm 深度范围内集中 90%以上的地下生物量, 形成致密草皮层, 有利于水分聚集以外, 有关实验研究表明山区草甸植被(包括

相对低矮的灌丛草甸)的覆盖度增加, 将减少地面水分蒸发[16]也是主要因素; 同时, 由于高覆盖植被的截留以及降水通过植被后向土壤的缓渗, 使得大部分时间内上层土壤处于阴湿状态.

4 结论与讨论

(ⅰ) 高山草甸土壤是一类比较特殊的草地土壤, 由于分布于高海拔地带, 靠近河川径流发源区, 其特性变化不仅与全球变化关系密切, 而且对河川径流水文过程影响巨大. 以土壤养分特征、土壤物理特征以及土壤水分特征为特性要素, 研究表明, 高寒草甸草地覆盖变化将使高山草甸土壤特性发生显著变化: 高寒草甸草地中度退化, 覆盖度由 90%以上降低到 60% ~ 70%时, 土壤上层有机质含量将锐减 30% ~ 35%, 但植被覆盖度在 30%与 60%之间变化时, 上层土壤有机质含量在 45 ~ 50 g/kg 间保持相对稳定; 植被覆盖度低于 30%时, 上层土壤有机质含量再度呈现急剧减少的趋势, 然而深层土壤养分要素变化复杂, 与地表植被覆盖变化之间没有明显的依从关系.

(ⅱ) 土壤水分含量随植被覆盖变化也表现出上层土壤与深层土壤不尽相同的特点, 土壤含水量随植被覆盖增加呈现显著增加, 其变化规律近似于抛物线. 当植被盖度大于 60%时, 植被盖度每增加 10%, 浅层土壤含水量增加幅度可达 5% ~ 15%, 在植被盖度由 30%增加到 70%时, 与土壤养分变化截然不同, 土壤含水量显著增加 20% ~ 25%. 深层土壤水分变化相对复杂, 与植被覆盖度之间没有明显的依存关系.

(ⅲ) 随地表植被退化、植被覆盖度降低, 土壤密实度下降, 原有的致密根系层也逐渐风化剥离, 地下生物量显著减少, 土壤草土含量比也显著下降, 水土流失加剧, 土壤容重增大, 砾石含量增加, 土壤显著粗砺化. 根据土壤容重以及养分要素含量变化, 在 30 cm 土壤厚度范围内, 粗略估算植被覆盖度从 90%下降到 70%时, 土壤损失有机质 8370 kg/hm^2, 损失氮素 1590 kg/hm^2; 若草地遭受严重退化, 植被覆盖度从 90%下降到 30%以下时, 有机质将流失 14890 kg/hm^2, 氮素损失将达到 5505 kg/hm^2.

近 30 年来, 研究区域气候变化与草地超载过牧不断加剧草地退化趋势[12]; 在高寒草甸分布区, 土壤水热状况与植被覆盖条件密切相关, 因此, 土地覆盖变化不仅代表了植被条件变化, 也反映了土壤的水热条件的改变. 另外, 在高寒草甸草地植被退化过程中, 高原鼠类的作用不可忽视, 鼠害加剧植被退化, 直接改变土壤物理结构特征, 并随地下洞穴密度加大, 土壤疏松, 土壤侵蚀作用加强. 这些因素可能是导致高山草甸土壤特性随植被覆盖变化而变化的主要原因. 保护高山草甸草地植被生态, 对于维护区域土壤环境意义重大. 另外, 由于原生高山草甸土壤的高有机质含量特征, 当区域性大范围草甸植被退化时, 在有机质大量流失过程中, 土壤释放的 CO_2 及其对全球变化的作用是值得考虑和研究的问题.

致谢 本工作受国家自然科学基金(批准号: 90102006, 40171002)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-10-06, KZCX1-SW-04)资助.

参 考 文 献

1 Turner B L, Skole D, Sanderson S, et al. Land-use and land-cover change: Science/research plan. IGBP Report 35 / HDP Report 7. Stockholm and Geneva, 1995. 12 ~ 120
2 李秀彬. 全球变化研究的核心领域——土地利用/覆盖变化的国际研究动向. 地理学报, 1996, 51(6): 553 ~ 557
3 龚子同, 陈鸿昭, 骆国保. 人为作用对土壤环境质量的影响及对策. 土壤与环境, 2000, 9(1): 7 ~ 10
4 王效举, 龚子同. 红壤丘陵小区域不同利用方式下土壤变化的评价和预测. 土壤学报, 1998, 35(1): 135 ~ 139
5 Lai R. Soil erosion and land degradation: The global risks. Adv Soil Sci, 1990, 11: 169 ~ 172
6 Hillel D. Research in soil physics: A review. Soil Sci, 1991, 151: 30 ~ 34
7 史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践. 北京: 科学出版社, 2000. 11 ~ 43
8 Zhang L, Dawas W R, Reece P H. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resour Res, 2001, 37(3): 701 ~ 708
9 Chapman P J, Edwards A C, Reynolds B. The nitrogen composition of streams draining grassland and forested catchments. In: Heathwaite L, ed. Impact of Land-Use Change on Nutrient Loads from Diffuse Sources, IAHS Publ, No 257. 1999. 17 ~ 26
10 Withers P J A, Dils R M. Transfer of phosphorus from small agricultural basins with variable soil types and land use. In: Heathwaite L, ed. Impact of Land-Use Change on Nutrient Loads from Diffuse Sources, IAHS Publ, No 257. 1999. 41 ~ 50
11 李文华, 周兴民. 青藏高原生态系统及优化利用模式. 广州: 广东科学技术出版社, 1998. 19 ~ 67
12 王根绪, 程国栋, 沈永平, 等. 江河源区的生态环境变化与综合保护研究. 兰州: 兰州大学出版社, 2001. 47 ~ 62
13 鲁如坤. 土壤-植物营养学. 北京: 化学工业出版社, 1998. 45 ~ 67
14 周兴民. 中国嵩草草甸. 北京: 科学出版社, 2001. 188 ~ 206
15 刘伟, 王启基, 王溪, 等. 高寒草甸“黑土型”退化草地的成因及生态过程. 草地学报, 1999, 7(4): 300 ~ 307
16 康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 概念性水文模型在出山径流预报中的应用. 地球科学进展, 2002, 17(1): 18 ~ 26

(2002-04-01 收稿, 2002-06-13 收修改稿)