

瀑布沟水库干热河谷消落带土壤氮时空分布特征

辛志远, 夏建国

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要:以瀑布沟水库消落带土壤为研究对象,以海拔、土地利用与土地覆盖(LULC)、地形与时间为影响因子,对消落带0—40 cm土壤进行采样。采样时间分别为2017年4月25日、2017年7月5日和2018年4月25日,从时间上探讨了消落带雨热同期的夏季与1年轮回对土壤全氮与碱解氮含量的影响。结果表明:(1)消落带全氮和碱解氮含量随土层深度的增加而降低。(2)消落带低海拔地区全氮和碱解氮含量高于高海拔地区。(3)消落带全氮和碱解氮含量平均值大小为淤泥>草地>旱地>裸地。(4)消落带全氮和碱解氮含量与地形因子LS值呈反比。(5)夏季采集的土壤样本全氮与碱解氮含量显著低于2次4月采集的样本。从时间和空间上解释瀑布沟消落带土壤全氮与碱解氮含量的分布特征,为瀑布沟消落带的生态环境治理提供科学的数据支撑。

关键词:瀑布沟水库;消落带;干热河谷;土壤氮;时空分布

中图分类号:S524; S144

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)02-0181-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.026

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Soil Nitrogen of the Dry-hot Valley in the Hydro-fluctuation Belt of the Pubugou Reservoir

XIN Zhiyuan, XIA Jianguo

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: In this paper, the 0—40 cm soil in the hydro-fluctuation belt of the Pubugou reservoir was collected in the study area according to different land use and land cover (LULC), elevation, topography and time. The sampling time was April 25, 2017, July 5, 2017 and April 25, 2018, the influence of summer and annual cycle on soil total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen content was analyzed. The results showed that: (1) The contents of total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen decreased with the increase of soil depth. (2) The contents of soil total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen in low altitude area was higher than that in high altitude area. (3) The average contents of soil total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen was: sludge> grassland> dry land> bare land. (4) The contents of soil total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen was inversely proportional to the terrain factor LS. (5) The contents of total nitrogen and alkali-hydrolyzed nitrogen in soil samples collected in summer were significantly lower than that in April. This study explored the distribution characteristics of soil total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen contents in the hydro-fluctuation belt of the Pubugou reservoir from time and space, which could provide scientific data support for the ecological environment management of the Pubugou reservoir.

Keywords: Pubugou reservoir; hydro-fluctuation belt; dry-hot valley climate; soil nitrogen; time and space distribution

水库消落带是指库水于季节性水位涨落和周期性蓄水使被淹没的土地周期性露出水面的区域^[1]。消落带是衔接水陆的生态系统交错带,具有生物的多多样性、生态的脆弱性和人类活动的频繁性等特点^[2]。

有研究^[3-4]表明,消落带是库水氮磷等富营养化的主要来源,而且消落带土壤频繁的干湿交替还会导致土壤温室气体N₂O排放量大幅增加^[4]。因此,合理利用与保护消落带土壤,对消落带的生态文明和可持续

收稿日期:2019-07-22

资助项目:国家科技计划项目“高山河谷金属采选场地及周边土壤污染防治技术研发与模式构建”(2018YFC1802605);四川农业大学学科建设双支计划项目(2019)

第一作者:辛志远(1991—),男,博士研究生,主要从事土地生态学研究。E-mail:295046116@qq.com

通信作者:夏建国(1967—),男,教授,主要从事土地资源与环境演变研究。E-mail:xiajianguo@126.com

发展道路的建设具有重要的积极意义。

干热河谷地区光热资源充足,但是气候炎热、少雨,且降雨季节集中,因此土地退化、肥力降低与水土流失是其生态安全与经济发展面临的最大威胁。许多科研工作者^[5-6]对干热河谷地区土壤水分、氮等养分特征与空间分布规律作了大量研究,为各项具体的生态工程提供了科学的理论指导。

以干热河谷区的消落带为研究对象的文章鲜有报道,而且瀑布沟水库消落带水位落差达到 60 m,远超三峡水库的 30 m,地形复杂多变,水库周期性淹没与夏季高温多雨的影响,使土壤流失和水体污染现象较普遍。本文以瀑布沟水库消落带 0—40 cm 土壤为研究对象,在空间上考虑了土地利用与土地覆盖(LULC)、海拔和地形,在时间上考虑了干热的河谷气候,探讨了土壤全氮与碱解氮含量 1 年内的时空变化特征,为消落带生态环境保护提供科学的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

瀑布沟水电站库区(29°14′—29°24′N,102°21′—102°49′E)位于四川省大渡河下游上段,受焚风效应影响,属于干热河谷气候,具有干、湿季节明显的气候特征。每年的 5—10 月为雨季(其中 6—8 月降雨最为集中),11 月到翌年 4 月为干季。雨季主要是受西南季风控制,具有气温高、湿度大、雨天多的特点;干季主要是受西风带南支干暖气流的影响,晴天较多,气候干燥、降水少。瀑布沟水电站消落带区域在 790~850 m 范围内变化,水库水位最大消落深度 60 m。因为研究区域轮廓长而窄,所以图 1 只显示了消落带中间区域,本文后面的图都会显示整个研究区域。

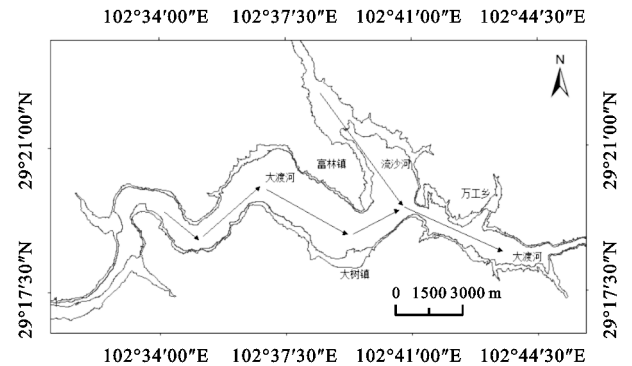


图 1 研究区地理位置

1.2 样品采集与处理

1.2.1 采样点设计原则 根据研究区的实际情况,在考虑样点代表性与空间分布均匀性的基础上,结合研究区取样安全、可采点区域、高程和土地利用方式等情况进行采样点布设。

(1)海拔。消落带不同海拔意味着不同的库水淹没时间,海拔越低,淹没时间越长。库水周期性反复

升降下,不同淹没时间的土壤,理化性质必然存在差异^[7]。在实际选点中,沿着消落带每确定 1 个采集土壤的区域,按 790~820,820~850 m 2 个海拔段各取 1 个点(图 2)。

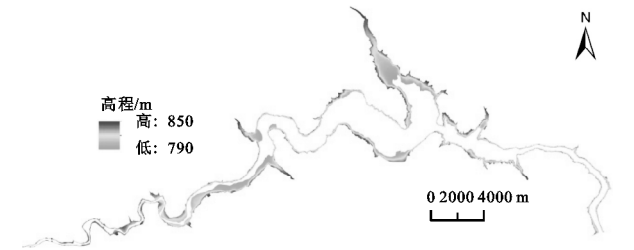


图 2 瀑布沟水库消落带数字高程模型(DEM)

(2)土地利用与土地覆盖(LULC)。不同的土地利用类型直接影响土壤有机碳含量^[8]。根据实地观察,消落带 LULC 类型分为淤泥、草地、旱地、裸地、裸岩和堡坎,其中裸岩和堡坎上面没有覆盖泥土,不用取样(图 3)。

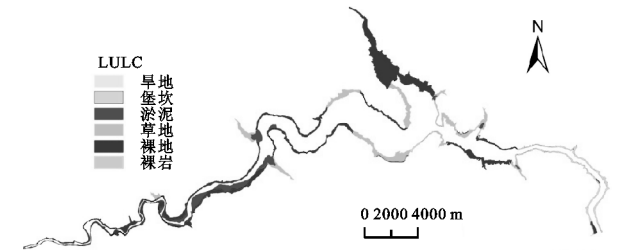


图 3 瀑布沟水库消落带地面使用与地面覆盖(LULC)图

(3)地形。地形因素影响水热条件和有机物质的再分配,对土壤氮素的积累和释放有较大影响^[9]。瀑布沟消落带水库蓄水位落差达 60 m,而且大多地势陡峭,环境复杂。在实际选点中,出现较大坡度变化的地形需要增加采样点,并使用数字高程模型(DEM)计算地形坡度、坡长等特征。

(4)时间。季节性温度升高会对消落带落干期土壤的氮含量带来显著影响^[10]。瀑布沟水库属于干热的河谷气候,6—8 月是雨热最集中的时期。采样共分 3 次进行。第 1 次为 2017 年 4 月 25 日,此时气候干热,水库蓄水基本达到全年最低水位,消落带暴露较完整;第 2 次为 2017 年 7 月 5 日,此时正值最炎热多雨的夏季,与第 1 次采样相比,分析不同气候对土壤氮含量的影响;第 3 次为 2018 年 4 月 25 日,与第 1 次采样相比,分析 1 年轮回后对土壤氮含量的影响。3 次采样都尽量保证在同一区域内,以方便进行对比分析。

根据前面所述条件,研究区消落带第 1 次所选采样点共计 48 个,第 2 次为 22 个(消落带低海拔地区已经被淹没),第 3 次为 48 个。采集点需要记录经纬度、高程、LULC 情况、植被覆盖情况与地势特点。采样点分布见图 4。

1.2.2 样品采集与处理 采样深度分为 0—10,10—

20, 20—40 cm (40 cm 以下石砾含量增加迅速, 且土壤坚实度非常高, 基本上为母质。使用军工铲来挖掘采集土壤, 并用环刀法测定土壤容重。土壤样品在室内风干分后, 研磨过 0.2 mm 的尼龙筛, 全氮含量采用凯氏定氮法测定, 碱解氮含量采用碱解氮扩散法测定。

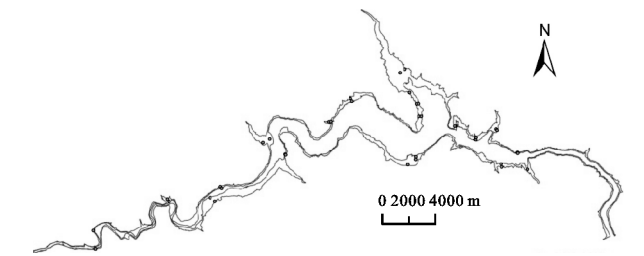


图4 土壤采样点分布

1.3 数据处理与消落带数据库建立

1.3.1 资料来源与处理 在研究区, 由专业土地测绘人员使用全站仪对消落带进行现场测量记录。研究区地理位置图(图1)由海拔 850, 790 m 的等高线连接而成, 并导入经纬线和注明重要地理事物。将高程点导入 ArcGIS, 利用 3D 模块生成数字高程模型(DEM)图(图2)(分辨率为 5 m×5 m)。由于研究区面积不大, 因此土地利用与土地覆盖(LULC)图(图3)(分辨率为 5 m×5 m)为实地观测记录, 并配合 DEM 图绘制。

1.3.2 地形因子计算方法 为了统一分析地形因子, 使用土壤通用流失方程(USLE)中的坡长因子 L 和坡度因子 S 来计算地形因子。本文中 L 因子采用的是坡面尺度的坡长因子计算公式, LS 计算公式为:

$$LS = s \times \left[\frac{\lambda}{22.1} \right]^m \tag{1}$$

式中: λ 为坡长(m); m 为坡长指数; s 为坡度(°)。指数 m 的推荐值为:

$$m = \begin{cases} 0.5 & S \geq 5\% \\ 0.4 & 3\% \leq S < 5\% \\ 0.3 & 1\% \leq S < 3\% \\ 0.2 & S < 1\% \end{cases} \tag{2}$$

USLE 中的坡度因子计算关系式是建立在缓坡观测资料上的, 其允许计算的最大坡度为 18%(约为 10)^[11]。本文结合 Mccool 等^[11] 的缓坡坡度公式和 Liu 等^[12] 的陡坡坡度公式:

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 (\theta < 5\%) \\ 16.8 \sin \theta - 0.50 (5\% \leq \theta < 10\%) \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 (\theta \geq 10\%) \end{cases} \tag{3}$$

式中: S 为坡度因子; θ 为坡度(°)。根据以上算法得到每个像元的地形因子值。

1.3.3 数据处理方法 常规统计分析、单因素方差分析均在 SPSS 20 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤全氮和碱解氮含量统计特征

由于第 2 次采样仅在高海拔处采集, 为了更科学地对比 3 次采样的氮含量变化, 将统计数据按海拔分为 820~850 m (高海拔) 与 790~820 m (低海拔) 2 段。

从表 1 和表 2 可以看出, 整个研究区土壤的全氮与碱解氮含量均随土层深度的增加而减少, 这是因为土壤中的氮主要来源消落带区域以及最高水位线以上随水流下来的一些动植物残体, 还有少量来自于大气降水^[13]。这些氮源主要集中在土壤表层, 随着土层深度的增加, 外界对土壤氮素合成和矿化等作用逐渐较小, 这与三峡库区的研究结果^[13-15] 一致。

研究区土壤的全氮与碱解氮含量在 3 次采样中均呈现先下降再上升的趋势, 这是因为第 2 次处于雨热同期的夏季。有研究^[10, 16-17] 表明, 温度是控制土壤矿化的重要因素, 土壤 NO_2 排放、氨挥发、净硝化、净氮矿化速率均与温度升高呈正比, 而且夏季降雨量大, 消落带地形多陡峭, 土壤表层养分会随雨水流失, 通过径流方式回归库水中, 这对库水的营养化和污染是值得重视的。第 1 次采样数据略大于第 3 次采样, 这是因为水库从 2009 年开始淹水, 采样时间为 2017 年与 2018 年, 历经 8~9 年的淹水, 消落带土壤化学性质和物理性质已经趋于稳定了。

表 1 和表 2 对比可以看出, 不同采样次数和不同深度的土层下, 消落带海拔 790~820 m 的全氮、碱解氮含量基本都大于海拔 820~850 m 的。这是因为消落带低海拔区域长期淹水, 使土壤处于强还原状态, 动植物残体分解缓慢, 有利于氮素的积累, 而且全氮与碱解氮含量极高的淤泥只分布在低海拔区域, 这与宫兆宁等^[18] 对官厅水库消落带的研究结果一致。

2.2 不同 LULC 下土壤全氮和碱解氮含量分布特征

从图 3 可以看出, 研究区消落带的 LULC 分为草地、裸地、旱地、淤泥、裸岩和堡坎, 其中裸岩和堡坎上面没有覆盖泥土, 不在研究范围内。由于淤泥仅分布在海拔 790~820 m 地段, 因此表 3 中没有淤泥的统计数据。

从表 4 可以看出, 在不同采样次数和 0—20 cm 的土层下, 消落带全氮和碱解氮含量平均值大小均呈现为淤泥>草地>旱地>裸地, 这与谭波^[19] 对三峡库区消落带的研究结果基本是一致的。主要是因为淤泥分布在海拔较低的区域, 由于长时间的淹水, 增强了光合细菌、嫌气性固氮菌等微生物的活动, 提高了它们的固氮水平。而且淤泥所在区域地形比较平坦, 动植物残渣与其他氮源物质容易在其表面滞留, 有利于氮素的保存; 草地淹没时, 植物残体会向土壤提供氮源, 在土壤露出水面时, 土壤又会很快生长杂

草,这些在一定程度上减少了外界对土壤表层的干扰,对土壤表层养分提供了一定的保护;旱地表层的作物在一定程度上也固定了土壤养分,但其也会吸收大量的碱解氮,在人工干预下,农民会向土壤施加氮肥,因此旱地的全氮和碱解氮含量介于草地与裸地之间。旱地 0—10 cm 的土壤中碱解氮含量具有显著的差异性($P<0.05$),这是因为第 1 次和第 3 次采样是处于水库退水期,农民会对土壤施加氮肥以供农作物生长吸收,但是第 2 次采样是处于水库涨水期,农作

物已经收获,其速效氮一部分被农作物带走,一部分被降雨淋失、地表径流带走;裸地表层裸露,且地形相对陡峭,养分易受外界影响,相对容易流失。裸地 0—20 cm 土壤中 3 次采样的全氮与碱解氮的含量呈现出显著的差异性($P<0.05$)。在消落带 20—40 cm 的土壤中,外界对土壤的影响已经比较小,且长期淹水使土壤的化学性质趋于相同,因此不同 LULC 下的土壤全氮和碱解氮含量并没有与 0—20 cm 的土壤呈现一致的规律。

表 1 高海拔土壤全氮与碱解氮含量统计特征

土层深度/cm	指标	采样次数	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数
0—10	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.65	1.62	1.07	0.26	0.2430
		2	0.56	1.32	0.88	0.21	0.2386
		3	0.59	1.55	0.99	0.25	0.2525
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	90.12	200.03	127.95	28.20	0.2204
		2	75.21	168.15	105.60	23.73	0.2247
		3	85.22	191.17	121.25	26.25	0.2165
10—20	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.52	1.37	0.85	0.22	0.2588
		2	0.43	1.15	0.71	0.19	0.2676
		3	0.47	1.23	0.79	0.20	0.2532
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	73.13	188.10	111.80	28.37	0.2538
		2	61.12	155.21	92.21	22.91	0.2485
		3	69.14	179.05	105.95	26.60	0.2511
20—40	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.45	1.13	0.72	0.17	0.2361
		2	0.44	1.04	0.68	0.16	0.2353
		3	0.41	1.04	0.68	0.17	0.2500
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	51.08	118.15	88.75	20.27	0.2284
		2	44.12	104.05	77.45	17.52	0.2262
		3	48.23	113.14	84.51	19.18	0.2270

表 2 低海拔土壤全氮与碱解氮含量统计特征

土层深度/cm	指标	采样次数	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数
0—10	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.71	1.90	1.33	0.29	0.2180
		3	0.64	1.71	1.19	0.26	0.2185
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	107.12	239.19	145.24	37.06	0.2552
		3	106.65	227.08	138.23	38.14	0.2759
10—20	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.61	1.77	1.09	0.27	0.2477
		3	0.55	1.59	0.99	0.24	0.2424
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	63.22	206.17	122.33	33.41	0.2731
		3	59.32	189.24	116.32	31.56	0.2713
20—40	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.54	1.19	0.87	0.16	0.1839
		3	0.50	1.09	0.80	0.15	0.1875
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	67.31	145.21	98.76	20.97	0.2123
		3	64.98	137.21	93.29	19.22	0.2060

2.3 不同 LS 下土壤全氮和碱解氮含量分布特征

经过公式(1)、公式(2)、公式(3)计算,在 ArcGIS 中生成地形因子 LS 图(图 5),由自然间断点分级法

(Jenks)分为 4 个等级值。从图 5 可以看出,LS 值基本在 0.03~1.16 与 1.16~2.83 区域,2.83~5.04 与 5.04~13.78段比较少,且主要集中在图中最狭长的地段。

表 3 不同 LULC 下高海拔土壤全氮与碱解氮含量分布特征

土层深度/cm	指标	采样次数	裸地	旱地	草地
0—10	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.98±0.21a	1.10±0.35a	1.23±0.24a
		2	0.80±0.17b	0.91±0.30a	1.00±0.20a
		3	0.88±0.20ab	0.99±0.31a	1.16±0.20a
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	118.44±18.45a	136.00±17.44a	135.57±42.30a
		2	99.01±15.67b	106.75±17.50b	113.46±35.64a
		3	113.78±15.66b	127.25±18.99a	128.71±40.07a
10—20	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.78±0.13a	0.90±0.28a	0.90±0.29a
		2	0.65±0.12b	0.75±0.24a	0.75±0.24a
		3	0.71±0.13ab	0.81±0.25a	0.86±0.23a
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	105.67±17.85a	121.25±17.32a	114.29±44.44a
		2	88.35±14.90b	95.75±13.0b	95.02±36.37a
		3	101.56±15.29ab	114.01±17.79a	108.43±40.43a
20—40	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.69±0.13a	0.74±0.20a	0.75±0.23a
		2	0.65±0.13a	0.69±0.18a	0.71±0.20a
		3	0.64±0.12a	0.68±0.17a	0.73±0.22a
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	89.33±19.22a	94.25±11.02a	84.86±26.53a
		2	79.89±16.05a	79.25±10.23a	74.71±23.29a
		3	86.11±17.00a	91.03±11.12a	80.14±25.58a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

表 4 不同 LULC 下低海拔土壤全氮与碱解氮含量分布特征

土层深度/cm	指标	采样次数	裸地	旱地	草地	淤泥
0—10	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	1.14±0.28	1.17±0.16	1.32±0.26	1.57±0.23
		3	1.03±0.25	1.14±0.10	1.19±0.24	1.41±0.22
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	120.50±10.57	127.02±21.21	139.29±32.80	183.19±35.11
		3	115.17±11.33	120.50±22.51	132.29±33.06	174.17±33.36
10—20	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.96±0.24	0.91±0.06	1.05±0.20	1.35±0.22
		3	0.87±0.22	0.85±0.09	0.95±0.18	1.22±0.22
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	110.17±11.55	109.12±28.28	100.29±17.38	164.67±27.02
		3	104.67±13.11	104.12±26.87	94.85±16.36	156.02±28.25
20—40	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.77±0.16	0.82±0.09	0.86±0.16	0.99±0.13
		3	0.71±0.14	0.75±0.08	0.79±0.15	0.92±0.12
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	92.67±16.62	90.51±19.09	87.43±15.55	120.83±16.82
		3	88.17±15.83	86.06±18.38	82.85±14.63	113.21±15.19

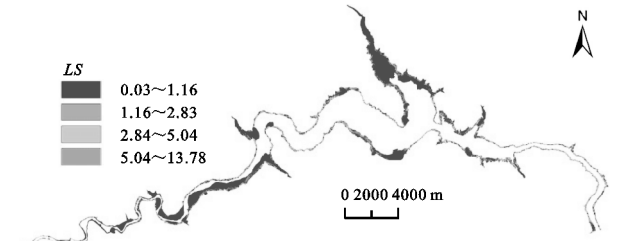


图 5 瀑布沟水库消落带 LS 因子分布

从表 5 和表 6 可以看出,在不同值段的 LS 下,全氮和碱解氮含量均没有呈现显著的差异性($P>0.05$),但是全氮和碱解氮含量与 LS 值大小基本呈反比关系。这是由于地势陡峭的地区,受到降雨与地面径流的冲刷作用更加强烈,土壤养分会随地表径流转移至地形较平缓的下坡区,导致植被生长较差,土壤氮素输入减少。而平坦地区拥有合理的土壤结构和充足养分,植被生长良好,凋落物较多,加上陡峭地区流失而来的氮素。因此,会相对积累较多的全氮与碱解氮^[20-21]。在淹水时,凸起的地形也会受到库水更

加强烈的冲刷,不利于全氮与碱解氮的累积。

2.4 土壤全氮和碱解氮含量与不同指标的相关性

将第 1 次采样的土壤全氮和碱解氮含量与不同指标进行相关性矩阵分析,可以直观看出单次采样中它们之间的相关性。由表 7 可知,0—40 cm 的土壤全氮含量与 0—40 cm 的土壤碱解氮含量具有显著相关性;0—40 cm 的土壤全氮含量与 LULC 和海拔具有显著相关性,但是 10—40 cm 土壤全氮含量与 LS 值没有显著相关性;0—40 cm 的土壤碱解氮含量与 LS 值呈显著相关性,但 20—40 cm 的土壤碱解氮含量与 LULC 没有显著相关性,且 0—40 cm 的土壤碱解氮与海拔也没有显著相关性。这是因为 LULC、 LS 与海拔对土壤全氮和碱解氮含量的影响有交互作用,它们单独作为因子不一定会有显著相关性,而且 20—40 cm 的土壤本身受外界干扰相对较小,不易产生显著相关性。

表 5 不同 *LS* 下高海拔土壤全氮与碱解氮含量分布特征

土层 深度/cm	指标	采样 次数	<i>LS</i> (0.03~1.16)	<i>LS</i> (1.16~2.83)	<i>LS</i> (2.83~5.04)	<i>LS</i> (5.04~13.78)
0—10	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	1.10±0.29a	1.10±0.31a	1.04±0.15a	0.98±0.20a
		2	0.88±0.23a	0.90±0.26a	0.88±0.14a	0.82±0.19a
		3	1.01±0.24a	1.01±0.31a	0.98±0.12a	0.89±0.22a
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	145.88±31.67a	118.67±17.58a	118.33±15.12a	92.51±13.54a
		2	118.75±29.22a	103.01±11.90a	91.11±12.12a	77.12±12.83a
		3	137.38±31.73a	112.83±13.47a	112.01±15.29a	88.04±14.24a
10—20	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.83±0.28a	0.88±0.25a	0.79±0.08a	0.75±0.13a
		2	0.69±0.24a	0.73±0.21a	0.67±0.15a	0.67±0.11a
		3	0.81±0.24a	0.79±0.22a	0.71±0.07a	0.70±0.16a
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	128.25±33.18a	105.50±17.43a	97.33±20.43a	78.12±12.83a
		2	104.12±27.60a	91.83±10.81a	74.16±17.44a	68.14±14.58a
		3	121.23±31.90a	100.33±13.85a	92.07±19.29a	76.52±15.54a
20—40	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.70±0.19a	0.73±0.20a	0.67±0.03a	0.66±0.12a
		2	0.65±0.17a	0.68±0.18a	0.63±0.09a	0.63±0.13a
		3	0.69±0.20a	0.68±0.19a	0.65±0.07a	0.62±0.14a
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	97.50±17.34a	91.67±18.23a	69.31±18.50a	63.12±14.32a
		2	83.88±15.35a	80.83±16.13a	61.33±16.56a	59.21±12.12a
		3	93.25±15.26a	87.01±16.26a	65.32±18.04a	61.22±11.54a

表 6 不同 *LS* 下低海拔土壤全氮与碱解氮含量分布特征

土层 深度/cm	指标	采样 次数	<i>LS</i> (0.03~1.16)	<i>LS</i> (1.16~2.83)	<i>LS</i> (2.83~5.04)	<i>LS</i> (5.04~13.78)
0—10	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	1.39±0.31	1.34±0.24	1.14±0.21	1.11±0.32
		3	1.29±0.29	1.23±0.11	1.02±0.12	1.00±0.29
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	152.58±37.23	143.67±43.57	120.12±28.03	118.50±12.12
		3	145.25±35.14	139.83±38.59	110.35±22.45	114.32±11.25
10—20	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	1.15±0.29	1.11±0.19	0.86±0.11	0.98±0.27
		3	1.03±0.26	0.86±0.11	0.78±0.14	0.88±0.24
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	130.08±33.65	115.33±39.82	109.21±28.15	103.51±16.36
		3	123.33±31.80	109.33±39.59	108.54±24.25	97.32±16.55
20—40	全氮/ (g·kg ⁻¹)	1	0.90±0.17	0.90±0.14	0.70±0.15	0.74±0.12
		3	0.83±0.17	0.70±0.15	0.64±0.11	0.68±0.11
	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	1	100.33±19.44	100.83±28.67	97.05±21.36	84.21±5.66
		3	94.50±17.38	95.50±26.94	94.54±22.35	80.01±15.56

表 7 土壤全氮、碱解氮与不同指标的相关性矩阵

项目	全氮 1	全氮 2	全氮 3	速氮 1	速氮 2	速氮 3	LULC	LS	海拔
全氮 1	1	0.90**	0.80**	0.60**	0.45**	0.40*	0.59**	-0.30**	-0.42**
全氮 2	0.90**	1	0.89**	0.63**	0.51**	0.42*	0.52**	-0.23	-0.44**
全氮 3	0.80**	0.89**	1	0.54**	0.38**	0.37*	0.45**	-0.22	-0.41**
速氮 1	0.60**	0.63**	0.54**	1	0.87**	0.70**	0.55**	-0.44**	-0.26
速氮 2	0.45**	0.51**	0.38*	0.87**	1	0.84**	0.41**	-0.43**	-0.17
速氮 3	0.40*	0.42*	0.37*	0.70**	0.84**	1	0.28	-0.42**	-0.24
土地	0.59**	0.52**	0.45**	0.55**	0.41**	0.28	1	-0.39**	-0.37*
<i>LS</i>	-0.30**	-0.23	-0.22	-0.44**	-0.43**	-0.42**	-0.39**	1	0.20
海拔	-0.42**	-0.44**	-0.41**	-0.26	-0.17	-0.24	-0.37*	0.20	1

注：* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关；* * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关；全氮 1、全氮 2、全氮 3 分别代表 0—10、10—20、20—40 cm 土壤全氮含量；速氮 1、速氮 2、速氮 3 分别代表 0—10、10—20、20—40 cm 土壤碱解氮含量。LULC 表示 4 种 LULC 类型；*LS* 表示 4 段 *LS* 值段；海拔表示 790~820 m 与 820~850 m 2 段。

3 讨论

本研究采样时间为 2017 年 4 月 25 日、2017 年 7 月 5 日与 2018 年 4 月 25 日,是 1 年的周期。这 1 年的数据虽然不能反映年际之间土壤全氮与碱解氮含量的变化特征,但能揭示瀑布沟水库消落带 1 年内季节的变化趋势。林俊杰等^[10]的研究也得出了类似的结论,他指出三峡库区消落带温度升高会使土壤硝化速率和净氮矿化速率显著增加($P < 0.05$),从而使养分流失几率大大增加。而且三峡库区消落带土壤养分变化呈逐年递减趋势^[13,15],这与本文第 1 次和第 3 次采样的试验数据规律吻合。

其他关于瀑布沟水库消落带土壤元素的研究^[22-23]在土壤采样点上都是呈点块状小范围的,而且时间比较早。而本文通过对瀑布沟水库消落带整个地区的采样观察,能比较完整和客观地反映消落带土壤氮素的分布和变化情况。

瀑布沟水库从 2009 年开始蓄水,至今已有 10 年,消落带土壤物理和化学性质已经趋于稳定。而库水受到消落带最高水位以上的工农业污染与库水中的渔业污染,反过来会影响消落带土壤的物理化学性质,消落带与库水的相互影响是今后需要关注与研究的重点。

4 结论

(1)水库消落带由于特殊的地理环境,频繁经历库水淹没与露出,不同土层深度、海拔、LULC 和地形都影响土壤氮含量的分布^[18-21]。具体表现为消落带全氮和碱解氮含量随土层深度增加而降低;消落带低海拔地区全氮和碱解氮含量高于高海拔地区;消落带全氮和碱解氮含量平均值大小顺序均呈现为淤泥>草地>旱地>裸地;消落带全氮和碱解氮含量与地形因子 LS 值呈反比。

(2)在 3 次采样中可以看出,夏季的高温多雨会促使全氮和碱解氮的流失,但是 2 次 4 月底的土壤样本全氮和碱解氮含量没有显著性差异($P > 0.05$),瀑布沟水库蓄水至今已经长达 10 年,消落带物理化学性质已经趋于稳定。淹水时,库水会反过来影响土壤养分含量。在夏季,消落带裸地和旱地存在向库水中流失氮素的现象,会加剧库水富营养化的风险,

(3)为了控制消落带土壤与库水的相互污染,当地政府和相关部门可以尝试对消落带裸地进行植被恢复与禁止土地耕作等措施,来保护库水安全、消落带稳定及减少水土流失的现象。

参考文献:

[1] 程瑞梅,刘泽彬,肖文发,等.三峡库区典型消落带土壤化学性质变化[J].林业科学,2017,53(2):19-25.
[2] 郑海金,杨洁,谢颂华.我国水库消落带研究概况[J].中国水土保持,2010(6):26-29.
[3] 吕凤玲,欧阳炜,宋艳曦,等.狗牙根与空心莲对水库消

落带土壤氮磷释放影响的模拟[J].水土保持学报,2019,33(3):240-245,253.
[4] 程芳,丁帅,刘素美,等.三峡库区及其下游溶解氧化亚氮(N_2O)分布和释放[J].环境科学,2019,40(9):4230-4237.
[5] 秦纪洪,黄雪菊,陈蓓,等.干湿交替格局对川西南干热河谷土壤碳氮释放的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):250-254.
[6] 廖洪凯,龙健,李娟,等.西南地区喀斯特干热河谷地带不同植被类型下小生境土壤碳氮分布特征[J].土壤,2012,44(3):421-428.
[7] 康义.三峡库区消落带土壤理化性质和植被动态变化研究[D].北京:中国林业科学研究院,2010.
[8] 王绍强,刘纪远.土壤碳蓄积量变化的影响因素研究现状[J].地球科学进展,2002,17(4):528-534.
[9] 罗由林,李启权,王昌全,等.川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(1):177-185.
[10] 林俊杰,张帅,刘丹,等.季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响[J].环境科学,2016,37(2):697-702.
[11] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers,1989,32(1):1571-1576.
[12] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE,1994,37(6):1835-1840.
[13] 简尊吉,裴顺祥,郭泉水,等.三峡水库峡谷地貌区消落带土壤氮磷钾、有机质含量和 pH 值的时空动态[J].应用生态学报,2017,28(9):2778-2786.
[14] 沈雅飞,王娜,刘泽彬,等.三峡库区消落带土壤化学性质变化[J].水土保持学报,2016,30(3):190-195.
[15] 郭燕,程瑞梅,肖文发,等.三峡库区消落带土壤化学性质年际变化特征[J].林业科学,2019,55(4):22-30.
[16] 辛志远,王昌全,申亚珍,等.水基包衣控释掺混肥料一次性施用对单季稻氮素利用的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(1):109-114.
[17] 赵宁,张洪轩,王若梦,等.放牧对若尔盖高寒草甸土壤氮矿化及其温度敏感性的影响[J].生态学报,2014,34(15):4234-4241.
[18] 宫兆宁,李洪,阿多.官厅水库消落带土壤有机质空间分布特征[J].生态学报,2017,37(24):8336-8347.
[19] 谭波.三峡库区消落带湿地土壤碳氮的分布研究[D].重庆:西南大学,2011.
[20] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.赤峰市小流域地形因子对土壤有机碳密度的影响[J].中国水土保持,2014(3):43-46.
[21] 王婷婷.不同烘干温度对森林土壤有机碳含量测定的影响[J].林业科技,2016,41(3):24-26.
[22] 赵小波.汉源瀑布沟水电站消落区氮释放模拟研究[D].成都:四川农业大学,2011.
[23] 仲雨猛.汉源瀑布沟水电站消落区磷释放特征及风险识别[D].成都:四川农业大学,2010.