

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

关中平原 500~10 ka BP 黄土地层 岩溶作用研究

赵景波

(陕西师范大学地理系, 西安, 710062)

内容提要 根据关中平原黄土地层岩溶作用产物的研究, 可将该区 500~10 ka BP 黄土地层岩溶作用分为北亚热带侵蚀-溶蚀型、温暖湿润带强溶蚀-侵蚀型、温冷半湿润带中溶蚀-侵蚀型和温冷半干旱带弱溶蚀-侵蚀型 4 种。根据古土壤发育时岩溶作用垂向分带遗迹, 可将前人划分的渗流带进一步分为上部非饱和循环强溶蚀亚带、中部过饱和循环沉淀亚带和下部不稳定循环弱溶蚀-弱沉淀亚带。3 个亚带的划分对确定 CO_2 在垂向上的循环有重要指示意义。该区 500~10 ka BP 可分为 10 个岩溶发育阶段, 构成 5 个岩溶旋回, 发展趋势是由强变弱。

关键词 黄土地层 岩溶分带 岩溶类型与演变 CO_2 循环

黄土地层富含 CaCO_3 , 其中 CaCO_3 的溶解和迁移被称为黄土岩溶。虽然人们对黄土地层中的 CaCO_3 进行了许多研究, 但以往研究的目的是探索气候环境的变化^[1,2], 很少注意到黄土地层 CaCO_3 含量对岩溶学研究的重要意义。黄土地层对气候环境记录详细, 对岩溶作用的反映也很清楚。本文根据西安和宝鸡地区黄土地层岩溶作用遗迹的研究, 探讨 500~10 ka BP^[1] 的第 5 层古土壤到第 1 层黄土之间黄土地层岩溶作用特点和规律。黄土地层岩溶作用的研究对认识碳循环的演变和探索岩溶作用的理论问题有重要科学意义。

1 西安和宝鸡 500~10 ka BP 黄土地层中的岩溶作用

岩溶作用主要表现为 CaCO_3 的溶蚀和沉淀堆积以及伴随形成的溶蚀空间。黄土地层岩溶作用的表现是很明显的, 只是由于黄土地层中 CaCO_3 很分散, 所以不会出现明显的溶蚀空间。通过 CaCO_3 含量与存在形式的观察, 能够获得岩溶作用的有关资料。

对西安东郊刘家坡剖面第 1~6 层黄土和古土壤 64 块样品采用物相分析法分析 CaCO_3 含量(陕西师范大学岳应利等分析)可知, 这些层位中 CaCO_3 含量变化在 0.00%~56.29% 之间, 含量最高的层位是古土壤之下的 CaCO_3 沉淀层, 含量最低的层位是古土壤和受淋溶的黄土层, 含量居中的是未受淋溶的黄土层(图 1, A)。由于黄土与古土壤是交替出现的, 所以剖面中 CaCO_3 含量呈现明显的峰谷波动(图 1, A)。为证实这种变化的可靠性, 笔者在宝鸡市陵塬东坡相同层位采集了 62 块样品进行 CaCO_3 含量分析, 所获结果(图 1, B)与西安刘家坡剖面非常类似。

以上测定表明, 黄土地层 CaCO_3 含量可分为高、中、低 3 种层位, 它们的含量差异很大, 这

注: 本文为国土资源部“九五”科技项目(编号 9501104)和中国地质科学院岩溶动力学开放研究实验室资助, IGCP379 项目组成部分。

本文 1998 年 2 月收到, 1999 年 4 月改回, 周健编辑。

是否为岩溶作用的表现呢? 要解决这一问题, 还要结合 CaCO_3 存在形式的观察资料来确定。观察得知, 黄土地层中 CaCO_3 含量最高的层位是由 CaCO_3 结核层或钙板状沉淀层组成的, 也是黄土地层岩溶作用过程中最清楚的产物。虽然沉淀层中 CaCO_3 含量高低对岩溶作用强弱的指示意义不大, 但如后述, 沉淀层的迁移深度对岩溶作用及其垂向分带有重要指示意义。古土壤层中 CaCO_3 含量很低, 许多样品中含量为 0.00% 或接近这一含量, 这显然是岩溶作用过程中

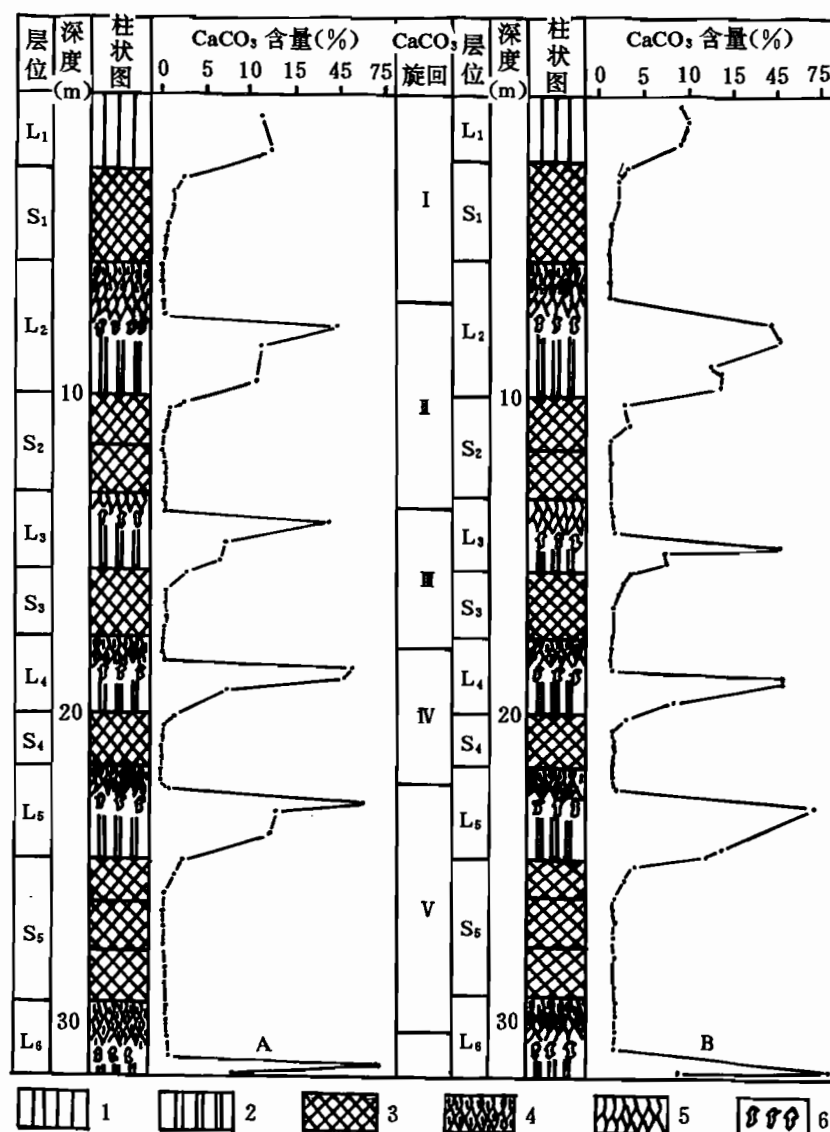


图1 西安、宝鸡黄土剖面上部 CaCO_3 含量曲线

Fig. 1 Content curves of CaCO_3 in upper part of loess sections in Xi'an and Baoji
 A—西安东郊刘家坡剖面; B—宝鸡市陵塬西府村剖面; 1—马兰黄土; 2—离石黄土; 3—古土壤;
 4—含铁质胶膜的淋溶黄土; 5—不含铁质胶膜的淋溶黄土; 6— CaCO_3 沉淀层
 A—Section at Liujiapo village in east suburb of Xi'an; B—section at Xifu village in Lingyuan
 of Baoji; 1—Malan loess; 2—Lishi loess; 3—paleosol; 4—leached loess with ferrous clay film;
 5—leached loess without ferrous clay film; 6—illuvial layer of CaCO_3

CaCO_3 受到强烈溶蚀并迁移的结果。这一部分残余的 CaCO_3 含量越少,指示岩溶作用越强。在每一黄土层上部的淋溶黄土中, CaCO_3 含量也很低,这也是受到了强烈溶蚀的结果,但不代表黄土层上部发育时岩溶作用强,它代表的是上覆古土壤形成时的岩溶作用在向深部发展(图 1A、B)。黄土层中、下部 CaCO_3 含量多在 5%~12% 之间,这些层位中的 CaCO_3 也受到了岩溶作用的强烈改造。野外可见,关中地区黄土层中、下部 CaCO_3 主要以薄膜、斑点和假菌丝的形式存在,在镜下观察到的是细小的方解石晶粒,原生碎屑方解石少见,这表明关中地区黄土层中的原生碎屑 CaCO_3 已在岩溶作用过程中受到溶解。因此,关中平原黄土中的 CaCO_3 主要是溶解后的沉淀 CaCO_3 ,是岩溶作用的产物和表现。 CaCO_3 的溶蚀必然伴随着溶蚀孔隙的出现,黄土中有些微孔隙就是这样形成的。除上述岩溶作用的表现外,黄土地下水的化学成分也显示出了活跃的岩溶作用。我们通过对雨水、黄土泉水及民井的观测表明,西安地区大气降水 pH 值为 6.5 左右, HCO_3^- 含量为 13 mg/L, Ca^{2+} 含量为 3 mg/L 左右;而黄土地下水 pH 值 > 7.5, HCO_3^- 含量多在 170 mg/L 以上, Ca^{2+} 含量为 40 mg/L 左右(pH 值用酸度计测定,其他采用酸碱滴定法),黄土地下水化学成分与石灰岩区岩溶水化学成分^[3]基本相同。黄土地下水与雨水化学成分的差异是雨水向地下入渗过程中溶解了 CaCO_3 的缘故。由于黄土中 CaCO_3 是以粉砂级碎屑、斑点等形式分散存在的,而黄土地层又是在风尘堆积过程中发育起来的,所以黄土地层中的岩溶作用是普遍的和清楚的。不但关中地区的黄土是这样,而且在广大黄土高原中部地区也是这样。

2 关中平原黄土地层岩溶作用垂直分带

人们通常将岩溶作用在垂向上分为渗流带、季节变化带、潜流带和深部循环带。黄土地层岩溶作用也应当具有这 4 个带,但各带对应关系是需要查明的。

在岩溶作用的垂向分带中,最上部地表部分的一个带是渗流带,该带下界为最高岩溶水位或洪水位的顶界。在关中平原区,古土壤发育时期所表现出来的岩溶作用较强的带是 CaCO_3 结核沉淀层到古土壤顶部之间的循环带(图 1A、B),该带底界距最高洪水位还有一定深度(图 2)。我们根据关中地区现代土壤 CaCO_3 沉淀层的测量得知,在不同地貌单元上, CaCO_3 沉淀层距最高岩溶水位或洪水位的深度不同,两者之间的距离变化在 5~100 m 之间。在一级阶地上,两者间的距离为 5~10 m,二级阶地上为 20~30 m,塬区多为 100 mm 左右。因此, CaCO_3 沉淀层之上的岩溶作用带只是渗流带的一部分(图 2)。

从西安和宝鸡第 1~5 层古土壤发育时的岩溶作用强弱变化来看, CaCO_3 沉淀层之上的岩溶作用比其之下的岩溶作用强烈的多(图 1A、B)。因此,根据岩溶作用的强弱差异,可将前人提出的、目前广泛应用的渗流带作进一步划分。从上至下,我们将渗流带划分为上部的非饱和循环强溶蚀亚带(I_1),中部的过饱和循环沉淀亚带(I_2)和下部的不稳定循环弱溶蚀-弱沉淀亚带(I_3)(图 2)。根据黄土地层 CaCO_3 溶蚀、沉淀、pH 及 CaCO_3 含量测定(图 1A、B),我们不难确定各带特征。非饱和循环强溶蚀亚带的特点是岩溶水多呈中、酸性反应,pH 值多在 6.5~7.5 之间, CaCO_3 溶蚀、迁移强,含量近于 0.00%(图 1A、B),一般不发生 CaCO_3 的沉淀。从 CaCO_3 沉淀层的顶部到地表均是该亚带(I_1)的厚度范围(图 2)。过饱和循环沉淀亚带的特点是岩溶水呈较强的碱性反应,pH 值一般 > 8,水溶液中 CaCO_3 处于过饱和状态,发生的是溶解产物的沉淀, CaCO_3 含量在 50% 以上(图 1A、B),不发生 CaCO_3 的溶蚀。该亚带的范围是在 CaCO_3 沉淀层上、下界之间(图 2)。下部的不稳定循环弱溶蚀-弱沉淀亚带特点是岩溶水呈碱性反

应, CaCO_3 的溶蚀与沉淀均有发生, 但均较弱。该亚带占据的范围是在过饱和循环沉淀亚带底界到最高岩溶水位之间。

上述划分的 3 个亚带在松散堆积物岩溶作用区是普遍存在的, 但在不同气候区, 各亚带厚度不同。一般说来, 在降水较多地区, 上部非饱和循环强溶蚀亚带厚度较大, 在降水少的地区该亚带厚度较小。中部的过饱和循环沉淀亚带厚度较小, 但变化不大, 通常为 0.5~1.0 m。下部的不稳定循环弱溶蚀-弱沉淀亚带的厚度变化较大, 它取决于上部第 1 亚带 (I_1) 的厚度范围。上部亚带 (I_1) 厚度越大, 下部亚带 (I_3) 厚度越小, 反之, 相反。因此, 下部亚带 (I_3) 在干旱区厚度大, 湿润区厚度小。

上述渗流带的进一步划分对深入研究岩溶学的理论问题和碳循环进行评价有重要意义。如 CaCO_3 沉淀层作为一个亚带能指示来自大气降水中和土壤中的 CaCO_3 到达该层顶界就已消耗完毕, 再向下的岩溶作用则需要其他来源的 CO_2 。这就解决了含量丰富的土壤 CO_2 [4~6] 对岩溶作用影响的深度问题。根据第一亚带的深度, 我们可以确定一个地区岩溶作用及碳循环强弱。该亚带深度越大, 岩溶作用越强, 吸收的 CO_2 越多。下部亚带对探讨深部岩溶作用强弱及 CO_2 来源也很有意义。

3 关中平原 500~10 ka BP 黄土岩溶作用类型与演变

人们通常将现代岩溶划分为以溶蚀为主的热带岩溶、以侵蚀-溶蚀为主的亚热带岩溶、以溶蚀-侵蚀为主的温带湿润区岩溶及以侵蚀-剥蚀为主的干旱寒冷地区岩溶。这是根据岩溶作用区的气候、作用强弱、方式划分的。我们可以根据黄土层发育时的气候与岩溶作用强弱分析, 确定黄土地区的岩溶作用类型。为便于与以往岩溶类型划分进行对比, 我们仍采用以上划分方案。

表 1 西安刘家坡第 1~5 层古土壤 CaCO_3 迁移深度

Table 1 Moved depth of CaCO_3 from first paleosol to fifth paleosol at Liujiapo village in Xi'an

层位	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
古土壤厚度(m)	3.2	1.7	1.7	1.4	4.2
CaCO_3 迁移深度(m)	5.4	2.9	3.1	2.7	6.7

注: S_1 代表第 1 层古土壤, 其余类推; CaCO_3 迁移深度是古土壤顶部到 CaCO_3 结核沉淀层之间的距离。

从 CaCO_3 含量和迁移深度来看, 第 1~5 层古土壤中、下部 CaCO_3 含量为 0.00% 或接近这一含量, 迁移后的 CaCO_3 沉淀在古土壤底部之下一定深处的黄土中(图 1, 表 1), 均指示古土

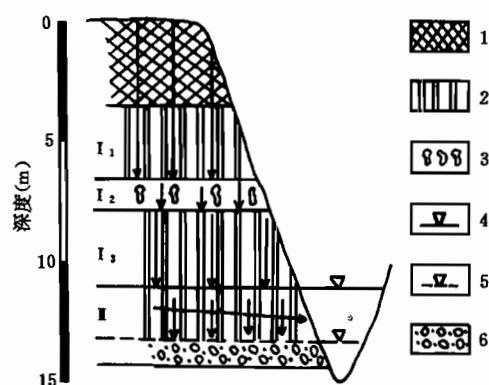


图 2 西安东郊二级阶地上第 1 层古土壤发育时岩溶作用带划分(当时处在一级阶地位置)

Fig. 2 Subdivision of vadose zone during first paleosol development on second terrace in east suburb of Xi'an

1—古土壤; 2—离石黄土; 3— CaCO_3 沉淀层; 4—高潜水位; 5—低潜水位; 6—河流冲积层; I_1 —非饱和循环强溶蚀亚带; I_2 —过饱和循环沉淀亚带; I_3 —不稳定循环弱溶蚀-弱沉淀亚带; II—季节变化带
1—Paleosol; 2—Lishi loess; 3—sedimentary layer of CaCO_3 ; 4—higher ground water level; 5—lower ground water level; 6—fluvial layer; I_1 —strong dissolution subzone with unsaturated water solution; I_2 —sedimentary subzone with supersaturated water solution; I_3 —weak dissolution or weak sedimentary subzone with unstable water solution; II—seasonal change zone

壤发育时的岩溶作用使 CaCO_3 迁出了古土壤层。具有这样的 CaCO_3 含量和迁移特征的土壤是中、酸性土壤^[7,8],代表淋溶带具有中酸性的介质环境,也代表这一带内的岩溶作用达到了中酸性阶段。铁铝氧化物的迁移对土壤环境和岩溶作用强度有更清楚的指示作用。对古土壤剖面的观察可知,第1、2、3、4、5层古土壤底部之下一定深处的黄土中可见许多红色铁质胶膜发育。

层位	深度 (m)	柱状图	岩溶类型				岩溶阶段	岩溶旋回
			A	B	C	D		
L ₁	10						1	I
S ₁							2	
L ₂							3	II
S ₂							4	
L ₃							5	III
S ₃	20						6	
L ₄							7	IV
S ₄							8	
L ₅							9	V
S ₅							10	

图3 关中平原 500~10 ka BP 岩溶演变

Fig. 3 Karst evolution between 500 and 10 ka in the Guanzhong Plain

A—北亚热带侵蚀-溶蚀型岩溶; B—温暖湿润强溶蚀-侵蚀型岩溶; C—温冷半湿润中溶蚀-侵蚀型岩溶; D—温冷半干旱弱溶蚀-侵蚀型岩溶; 图例同图1

A—Erosion-dissolution karst in subtropics; B—strong dissolution-erosion karst in south humid temperate zone; C—medium dissolution-erosion karst in north semi-humid temperate zone; D—weak dissolution-erosion karst in north semi-arid temperate zone; same legend as Fig. 1

铁铝氧化物的迁移发生在酸性介质中,它们在黄土层中出现指示第1、3、4、5层古土壤及其下的淋溶带的岩溶作用处于酸性条件。第2层古土壤中的红色胶膜未到达下伏的黄土中,指示其迁移较弱,酸性环境不明显。 CaCO_3 含量、迁移深度及铁质胶膜分布均显示,第1~5层古土壤发育时的岩溶作用至少达到了温湿区的溶蚀-侵蚀型(图3)。

古土壤类型研究表明,西安附近第3~5层古土壤为亚热带黄棕型古土壤^[7],第1和第2层古土壤分别属于棕壤型和淋溶褐型古土壤^[7],它们发育时的年均降水量都在800 mm以上^[7,9]。据古土壤类型确定,第3~5层古土壤发育时的岩溶作用类型为北亚热带的侵蚀-溶蚀型,第1、第2层古土壤发育时的岩溶作用为温带南部的强溶蚀-侵蚀型。

第1~5层黄土形成时的岩溶作用可根据黄土层的风化强弱和形成气候判断。笔者研究表明,西安附近第1~5层黄土发育时的年均温度为4~8℃,年均降水量为450~600 mm^[7],其中第3~5层黄土发育时的气候比第1~2层黄土发育时偏温湿。据黄土层发育时的气候确定,第3~5层黄土发育时为温冷半湿润条件下的中溶蚀-侵蚀型岩溶,第1~2层黄土发育时为温冷半干旱条件下的弱溶蚀-侵蚀型岩溶。

根据古土壤与黄土发育时岩溶作用强弱差异,我们可将500~10 ka BP的黄土层岩溶作用划分为10个主要阶段和5个岩溶旋回(图3)。在这10个岩溶阶段中,可分为北亚热带的侵蚀-溶蚀型(A),温暖湿润条件下的强溶蚀-侵蚀型(B),温冷半湿润条件下的中溶蚀-侵蚀型(C)和温冷半干旱条件下的弱溶蚀-侵蚀型(D)4种(图3)。由图3可见,关中平原500~10 ka BP岩溶作用发展趋势是由强变弱。

4 结论与讨论

综上所述,关中平原500~10 ka BP黄土地层普遍表现有岩溶作用,并清楚显示出其垂向分带和发育的强弱,是研究第四纪岩溶作用演变和岩溶学理论的

重要地层。

根据第1~5层古土壤发育时岩溶作用垂向分带表现,可将前人划分的渗流带进一步分为3个亚带,即上部的非饱和循环强溶蚀亚带、中部的过饱和循环沉淀亚带和下部的不稳定循环弱溶蚀-弱沉淀亚带。这3个亚带至少在北亚热带及其以北的松散堆积物岩溶区和具有一定厚度细粒风化层的基岩岩溶区是普遍存在的,各亚带划分标志明显,岩溶作用差异显著。这一划分对研究岩溶作用的垂向变化和对查明岩溶作用过程中 CO_2 来源与循环有重要科学意义。这一划分表明,中部过饱和循环沉淀亚带之上和之下的岩溶作用过程中 CO_2 应有不同的来源和循环。

根据不同时期岩溶作用的强弱,可将关中平原 500~10 ka BP 黄土地层岩溶作用分为北亚热带侵蚀-溶蚀型,温暖湿润带强溶蚀-侵蚀型,温冷半湿带中溶蚀-侵蚀型和温冷半干旱带弱溶蚀-侵蚀型4种。古土壤发育时的岩溶作用属于较强的前两种类型,黄土层发育时的岩溶作用属于较弱的后两种类型。古土壤发育时的岩溶作用特点是 CaCO_3 强溶蚀、强迁移,黄土发育时岩溶作用特点是 CaCO_3 弱溶蚀、弱迁移。

据黄土与古土壤岩溶作用的变化,可将关中平原 50~10 ka BP 的黄土地层岩溶作用划分为5个岩溶作用强的阶段和5个岩溶作用弱的阶段,它们构成5个岩溶旋回,这5个旋回从老到新的发展趋势是由强变弱。

石灰岩中 CaCO_3 的溶解会吸收 CO_2 ,对调节大气中 CO_2 起重要作用^[10~12],分布广泛的黄土地层在这方面与石灰岩具有同样的作用,很有必要进行深入定量研究。

参 考 文 献

- 1 刘东生等. 黄土与环境. 北京:科学出版社,1985. 246~248.
- 2 卢演俦. 黄土地层 CaCO_3 含量与更新世气候旋回. 地质科学,1981,(2):122~131.
- 3 蒋忠诚,袁道先,翁金桃,郭玉文,孙建成,王飞龙. 鲁中南区现代岩溶强度研究. 中国地质学会岩溶地质专业委员会编. 中国北方岩溶和岩溶水研究. 桂林:广西师范大学出版社,1992. 18~25.
- 4 赵景波. 陕西旬阳、镇安岩溶泉成分变化及岩溶发育特征. 中国岩溶,1996,15(4):376~381.
- 5 刘再华. 桂林岩溶地质实验场岩溶水文地球化学研究. 中国岩溶,1992,11(3):209~217.
- 6 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学. 重庆出版社,1988. 138~144.
- 7 赵景波. 西北黄土区第四纪土壤与环境. 西安:陕西科学技术出版社,1994. 28~48.
- 8 赵景波. 关中平原黄土中古土壤 CaCO_3 淀积深度研究. 科学通报,1991,36(18):1397~1400.
- 9 赵景波. 黄土中古土壤淀积类型. 地理学报,1995,50(1):35~40.
- 10 袁道先. 碳循环与全球岩溶. 第四纪研究,1993,(1):1~6.
- 11 Yuan Daoxian. Contribution of IGCP "karst processes and carbon cycle" to global change study. Episodes(IUGS),1998. 91~102.
- 12 徐胜友. 我国岩溶作用与大气温室气体 CO_2 源汇关系的初步估算. 科学通报,1997,42(9):953~956.

Karst Processes in Loess Strata Between 500 and 10 ka in the Guanzhong Plain

Zhao Jingbo

(Tourist and Environmental College, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710062)

Abstract

On the basis of a study of the karst processes in loess strata in the Guanzhong Plain, the karst processes between 500 and 10 ka in the area can be subdivided into the erosion-dissolution type of the north subtropics, strong dissolution-erosion type in the south humid temperate zone,

medium dissolution-erosion type in the north semi-humid temperate zone and weak dissolution-erosion type in the north semi-arid temperate zone. According to the karst remains in the vertical zoning section during the development of paleosols, the vadose zone defined by predecessors can be subdivided into three subzones, namely, the upper strong dissolution subzone with unsaturated water solution, the middle precipitation subzone with supersaturated water solution and lower weak dissolution or weak precipitation subzone with unstable water solution. The subdivision of the vadose zone is of very important significance for determining the CO_2 vertical circulation. Ten karst stages constituting 5 karst cycles occurring between 500 and 10 ka in the area can be determined and the developmental trend of karst processes was from strong to weak in the period.

Key words: loess strata; karst subzones; karst types and evolution; CO_2 cycle

作 者 简 介

赵景波,男,1953年生。1982年于西北大学地质系研究生毕业,先后获硕士、博士学位。现为陕西师范大学旅游与环境学院教授,主要从事第四纪地质与环境地质教学与科研工作。通讯地址:710062,西安市长安南路,陕西师范大学旅游与环境学院。
