

*The Quaternary climate in loess sediments:
Evidence from rock and mineral magnetic and
geochemical analysis*

Maurizio Sartori

**The Quaternary climate in loess sediments: Evidence
from rock and mineral magnetic and geochemical
analysis**

A Dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

Presented by

MAURIZIO SARTORI
Dipl. Natw., ETH-Zurich
Born: 12.6.1968
Locarno TI

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. F. Heller,	examiner
Prof. Dr. W. Lowrie,	co-examiner
Prof. Dr. M. E. Evans,	co-examiner
Dr. J. Beer,	co-examiner

ABSTRACT

Continuous accumulation of dust during the Quaternary has formed thick loess deposits on the northern continents, mainly in China, Europe and Central Asia. The magnetic properties of these aeolian sediments have recorded the paleoclimatic fluctuations in a detailed and complete way.

In the loess/paleosol sequence at Paks (Hungary), susceptibility was measured through a 49-meter profile of about 49 m depth: About 620 oriented samples were collected for rock magnetic and paleomagnetic investigations. The section covers a time span of about 850 ka, including the Brunhes and the youngest part of the Matuyama polarity chron (M/B boundary at 44.1 depth). Two loess and two paleosol samples were investigated magnetically in detail. They were split into 10 grain size fractions (ranging from 15 nm to 50 μm) using consecutive sedimentation and centrifugation steps. A strong grain size dependence of the magnetic susceptibility and other hysteresis parameters was observed. High susceptibility values measured in the paleosol samples, especially in the finest fractions, originate from neoformation of fine-grained iron oxides. Low temperature measurements identify magnetite and maghemite as the main carriers of the magnetic signal, and offer the possibility of separating the paramagnetic and ferromagnetic contributions from the total magnetic signal.

In the Ukraine, about 900 closely spaced oriented samples were collected from the 48 m thick loess/paleosol section at Roxolany to establish an absolute time frame for the loess sequence and to compare and correlate the magnetic properties with the lithologic data in the light of their paleoclimatic significance. The upper part of the investigated section is of normal polarity, with the M/B boundary found at ~35 m depth. By extrapolation beyond the M/B boundary an age of 1 Ma was assigned to the entire section. A timescale was obtained by matching the susceptibility variations in the profile with the variations of the astronomically-tuned oxygen isotopes in marine sediments. The susceptibility record dated in this way allowed correlation of the loess sequence at Roxolany with other loess sequences in Europe and China, confirming its evolution as a result of global paleoclimatic variations during the Early Pleistocene. Paleoclimatic reconstruction inferred from lithological observations gives evidence of important differences between the upper ~23 m and the lower part of the section: in the latter the paleosols are of braunlehm type, a Mediterranean humid and warm climate type soil, while in the younger part, the paleosols are chernosems formed in a less humid and slightly colder

environment. Magnetic measurements confirmed the significant differences derived from the lithological observations, but lead to the conclusion that simple linear relationships cannot be established between ferromagnetic enhancement, soil evolution and paleoclimatic development.

About 1'100 oriented loess and paleosol samples were collected at 5 to 10 cm intervals from two loess sequences in China (Xiagaoyuan, Gansu Province, western loess plateau and Houzhuang, Shaanxi Province, central loess plateau). The differences in magnetic properties between these two localities, where loess formed under different paleoclimatic conditions, were studied and the impact of global long- and short-term climate changes on the Chinese loess plateau was determined. Xiagaoyuan is situated in a very dry, semi-desertic region (mean annual precipitation of ~300 mm); the section has a depth of 23 m, and is mainly composed of pristine unaltered loess: only two paleosols and the Holocene soil were identified. The climate at Houzhuang is warmer and more humid (mean annual precipitation of ~600 mm). The section, which has been sampled to a depth of 20 m, has been subject to much stronger pedogenesis, and consists mainly of paleosols (three pedocomplexes formed during interglacials and three paleosols formed during interstadial periods) and weathered loesses. A chronostratigraphic subdivision was obtained by matching the magnetic susceptibility variations with the astronomically-tuned oxygen isotope record. A maximum age of ~130 ka for the section at Xiagaoyuan and of ~250 ka for the section at Houzhuang was established. The Blake geomagnetic polarity event could not be discovered at either site. The ferromagnetic mineral constituents are similar in both sections, with magnetite/maghemite as the main minerals responsible for the magnetic enhancement. Important differences, however, are expressed by the magnitude of the magnetic signals. The generally higher ferromagnetic concentration in the loess layers at Houzhuang than in the loesses at Xiagaoyuan formed in the same time interval, indicates that significant pedogenesis affected the loesses at Houzhuang not only during interglacials, but also during glacial periods. Grain size fractionated samples from Xiagaoyuan and Houzhuang give clear evidence of the regional climate differences. A progressive increase of the very fine-grained superparamagnetic ferromagnetic component was observed with increasing pedogenesis. This is due to *in situ* production of magnetic minerals rather than changes in ferromagnetic concentration of the source material. Another important difference between the two studied sections, also related to the different paleoclimate evolution in these regions, is given by the higher sedimentation

rate observed at Xiagaoyuan: the horizon corresponding to the boundary between oxygen isotope stage 5 and 6 was found at 23 m depth at Xiagaoyuan (corresponding to a mean sedimentation rate of 17.7 cm/ka) and at 7.5 m depth at Houzhuang (corresponding to a mean sedimentation rate of 5.8 cm/ka). The high resolution at Xiagaoyuan permits detailed correlation between the magnetic and sedimentologic record and the marine and ice core oxygen isotope variations for the last ~130 ka. The oxygen substages 5a-e can be correlated with the susceptibility signal from the pedocomplex S_1 (S_1S_1 , S_1L_1 , S_1S_2 , S_1L_2 and S_1S_3). This was not possible at Houzhuang because of the strong pedogenesis that characterizes the whole of the last interglacial there. High-frequency climate changes (Bond cycles, Heinrich events) as observed in the GRIP core seem to correlate with the fluctuations of the frequency dependent susceptibility measured in incipient pedogenic layers of loess layer L_1 at Xiagaoyuan.

The ^{10}Be concentration was measured using 64 bulk samples and 36 grain size fractions obtained from four samples (one loess and one paleosol sample for each section). The samples originate from the pedocomplexes S_1 which represent the last interglacial (age between ~70 and ~130 ka). An inverse relationship between grain size and ^{10}Be concentration was found. The measurements did not give evidence of a linear relationship between ^{10}Be concentration and susceptibility. ^{10}Be concentrations in Xiagaoyuan reflect median grain size changes rather than susceptibility variations. Grain size spectra analysis revealed that the median grain size alone is not a good parameter for describing a specific grain size distribution and may not represent the median grain size of the original loess forming dust. A future model for paleoprecipitation reconstruction using ^{10}Be and susceptibility fluxes should consider the variations of the atmospheric ^{10}Be flux which are controlled by the intensity changes of the Earth's magnetic field.

SOMMARIO

Durante il Quaternario, il costante accumulo di polveri ha dato origine in Cina, Europa ed Asia centrale ad importanti depositi di loess. Le proprietà magnetiche di questi sedimenti hanno premesso di ricostruire le fluttuazioni paleoclimatiche in modo dettagliato e completo.

Presso Paks (Ungheria), la suscettività magnetica è stata misurata lungo un profilo di loess spesso circa 49 m. Circa 620 campioni orientati sono stati raccolti per essere sottoposti ad una serie di misure magnetiche e paleomagnetiche. Il profilo ha un'età complessiva di ca. 850'000 anni, e comprende la polarità magnetica di Brunhes e l'intervallo più recente a polarità inversa di Matuyama (la transizione M/B è stata individuata ad una profondità di 44.1 m). Due campioni di loess e due provenienti da un paleosuolo sono stati sottoposti ad analisi magnetiche dettagliate. Ogni campione è stato sottoposto a processi di risedimentazione e centrifugazione in modo da ottenere 10 frazioni granulometriche. Si è osservata una forte correlazione tra suscettività magnetica, parametri d'isteresi e granulometria. Gli alti valori di suscettività nei paleosuoli, misurati soprattutto nelle frazioni più fini, sono causati dalla formazione di minerali di ossidi di ferro della dimensione dell'ordine dei nanometri. Misure magnetiche a bassa temperatura permettono di identificare magnetite e maghemite come i principali responsabili del segnale magnetico, e permettono di separare la componente paramagnetica della suscettività da quella ferromagnetica.

In Ucraina circa 900 campioni orientati sono stati raccolti presso Roxolany, lungo un profilo di loess spesso 48 m. Lo scopo era quello di ricostruire una scala temporale assoluta e correlare le variazioni delle proprietà magnetiche con i dati litologici interpretati da un punto di vista paleoclimatico. La parte superiore del profilo considerato ha polarità normale, e la transizione M/B si situa a 35 m di profondità. Un'età di 1 milione d'anni per l'intera sezione è stata determinata per estrapolazione in base al tasso di sedimentazione medio. Si è ottenuta una scala temporale correlando le variazioni di suscettività lungo il profilo con le variazioni dell'isotopo di ossigeno, calibrate su base astronomica, misurate in sedimenti marini. Il profilo di suscettività (con valori di punta caratteristici nei paleosuoli) datato in questo modo permette di correlare la sezione di Roxolany con altri profili in Europa ed in China, confermando come l'evoluzione dei depositi di loess nel tempo è il risultato dei cambiamenti a livello globale occorsi durante il Pleistocene tardo. Importanti differenze tra i primi 23 m del profilo e la parte sot-

tostante sono state messe in evidenza da ricostruzioni paleoclimatiche basate su osservazioni litologiche: nella parte inferiore i paleosuoli sono di tipo *braunlehm*, un suolo originato da un clima caldo ed umido di tipo mediterraneo, mentre nella parte superiore i paleosuoli sono di tipo *chernosem*, originati da un clima meno umido e più freddo. Le misure magnetiche confermano l'importante differenza individuata dalle osservazioni litologiche, sottolineando inoltre come non sia possibile stabilire una relazione di tipo lineare tra l'aumento del segnale ferromagnetico, l'evoluzione del suolo e lo sviluppo del paleoclima.

Circa 1'100 campioni orientati di loess e paleosuolo provenienti da due profili in Cina (Xiagaoyuan, provincia del Gansu, nel plateau di loess occidentale, e Houzhuang, provincia dello Shaanxi, plateau di loess centrale), sono stati raccolti ad intervalli di 5 - 10 cm. Lo scopo era determinare la differenza tra le proprietà magnetiche in questi due profili di loess, formati sotto l'influenza di condizioni paleoclimatiche differenti, e determinare l'impatto delle variazioni globali del clima, a lungo e corto termine, nel plateau di loess cinese. Xiagaoyuan è situato in una regione molto secca, semi desertica, con precipitazioni annuali medie attorno ai 300 mm; la sezione presa in considerazione raggiunge una profondità di 23 m ed è composta generalmente da loess inalterato: si è potuto identificare solo due paleosuoli, oltre al suolo olocenico. Il clima a Houzhuang è più caldo ed umido con precipitazioni annuali medie attorno ai 600 mm. Questa sezione, campionata fino ad una profondità di 20 m, è stata soggetta a processi pedogenetici molto pronunciati ed è composta da paleosuoli e loess disgregati. I paleosuoli comprendono tre complessi pedogenetici formati durante periodi interglaciali e tre paleosuoli formati durante periodi interstadiali. Si è ottenuta una suddivisione cronostratigrafica correlando le variazioni di suscettività con le variazioni dell'isotopo di ossigeno calibrate su base astronomica. Si è stabilita un'età massima di circa 130'000 anni a Xiagaoyuan e di circa 250'000 anni a Houzhuang. A Xiagaoyuan l'evento geomagnetico di Blake non è stato individuato, probabilmente a causa del basso tasso di sedimentazione. La componente ferromagnetica è simile in entrambi i profili e il segnale magnetico è causato dalla presenza di magnetite e magemite. Importanti differenze tra i due profili sono espresse dalla differenza di intensità del loro segnale magnetico. L'intensità generalmente più elevata del segnale magnetico nelle coltri di loess di Houzhuang rispetto agli strati formati durante lo stesso periodo a Xiagaoyuan è indicativo della maggiore attività pedogenetica a Houzhuang, non solo durante periodi interglaciali, ma anche durante i periodi glaciali.

Le differenze regionali tra questi due profili sono enfatizzate dai risultati ottenuti dai campioni frazionati. Una crescita dell'attività pedogenetica è accompagnata da un aumento della componente ferromagnetica più fine. Questo è il risultato della produzione *in situ* di nuovi minerali magnetici e non è dovuto ad una variazione della componente ferromagnetica nel materiale originario dal quale il loess si è formato. Un'ulteriore differenza tra i due profili, legata alle differenti condizioni paleoclimatiche in queste due regioni, si esprime attraverso un tasso di sedimentazione molto più elevato a Xiagaoyuan rispetto a Houzhuang. Infatti l'orizzonte corrispondente alla transizione tra lo stadio isotopico 5 dell'ossigeno e lo stadio 6 si trova ad una profondità di 23 m a Xiagaoyuan (tasso di sedimentazione medio: 17.7 cm/ka) e di 7.5 m a Houzhuang (tasso di sedimentazione medio: 5.8 cm/ka). L'elevata risoluzione a Xiagaoyuan permette di correlare in modo dettagliato i dati magnetici e sedimentologici con le variazioni dell'isotopo dell'ossigeno ottenute da carote di sedimenti marini e da carote di ghiaccio durante gli ultimi ~130'000 anni. I substadi 5a-e dell'isotopo dell'ossigeno possono essere correlati con la suscettività del complesso pedogenico S₁ (S₁S₁, S₁L₁, S₁S₂, S₁L₂ e S₁S₃). Questa operazione non è possibile a Houzhuang a causa dell'elevato grado di pedogenesi che caratterizzò l'intero ultimo stadio interglaciale. Le variazioni climatiche ad alta frequenza (cicli di Bond, eventi di Heinrich), osservate nella carota di ghiaccio del programma GRIP, possono essere correlate con le variazioni della suscettività in funzione della frequenza nei livelli con pedogenesi incipiente compresi nello strato L₁ a Xiagaoyuan.

La concentrazione di ¹⁰Be è stata misurata in 64 campioni di roccia totale e 36 frazioni ottenute da quattro campioni di roccia totale (un campione di loess e uno di paleosuolo per entrambe le sezioni cinesi). I campioni provengono dai complessi pedogenici S₁, e rappresentano l'intervallo di tempo corrispondente all'ultimo interglaciale compreso tra 130'000 e 70'000 anni. Si è stabilita una correlazione inversa tra granulometria e concentrazione di ¹⁰Be. Le misure non evidenziano una correlazione lineare tra la suscettività e la concentrazione di ¹⁰Be. A Xiagaoyuan la concentrazione di ¹⁰Be riflette maggiormente le variazioni granulometriche piuttosto che quelle di suscettività. Le analisi granulometriche hanno rilevato che il valore della granulometria media (*median grain size*) non sia sufficientemente indicativo del tipo di distribuzione. Oltre a ciò, questo valore potrebbe non corrispondere al valore della granulometria media del materiale originale dal quale il loess si è formato. In futuro, un modello per le paleoprecipitazioni

basato sui flussi di ^{10}Be e di suscettività dovrà essere sviluppato determinando innanzitutto le variazioni del flusso atmosferico di ^{10}Be . Quest'ultimo parametro dipende dalle variazioni di intensità del campo magnetico terrestre.